

T I R E

# 轮胎硫化传热机理研究

本书全面系统地阐述了轮胎材料热物性和橡胶硫化动力学等建模理论,进行了轮胎硫化过程的数值建模和试验,同时对轮胎硫化传热特性及其影响规律进行了讨论,最后开发出轮胎硫化专用软件。本书内容丰富新颖,创新性地提出多维橡胶热物性参数模型、混合定律模型和混合动力学模型等,同时又给出大量的软件源代码,对轮胎硫化理论的研究与应用有很好的指导意义。

张 建◎著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

巍巍交大 百年书香

www.jiaodapress.com.cn

bookinfo@sjtu.edu.cn



责任编辑 王华祖

封面设计 朱琳珺

责任营销 单元响

# TIRE



扫描二维码  
关注上海交通大学出版社  
官方微信

ISBN 978-7-313-12443-2



9 787313 124432 >

定价: 48.00元

# 轮胎硫化传热机理研究

张 建◎著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

本书全面系统地阐述了轮胎材料热物性和橡胶硫化动力学等建模理论,进行了轮胎硫化过程的数值建模和试验,同时对轮胎硫化传热特性及其影响规律进行了讨论,最后开发出轮胎硫化专用软件。

本书内容丰富新颖,创新性地提出多维橡胶热物性参数模型、混合定律模型和混合动力学模型等,同时又给出大量的软件源代码,对轮胎硫化理论的研究与应用有很好的指导意义。

本书既可供轮胎制造企业的工程技术人员参考,也可供相关专业的研究人员及在校师生阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

轮胎硫化传热机理研究/张建著. —上海:上海交通大学出版社,2015

ISBN 978-7-313-12443-2

I. ①轮… II. ①张… III. ①轮胎-硫化(橡胶)-研究②轮胎-传热-研究

IV. ①TQ336.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 304959 号

## 轮胎硫化传热机理研究

著 者: 张 建

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 苏州市越洋印刷有限公司

开 本: 787mm×960mm 1/16

字 数: 157 千字

版 次: 2015 年 1 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-12443-2/TQ

定 价: 48.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 10.5

印 次: 2015 年 1 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0512-68180638





# P 前 REFACE 言

硫化是轮胎制造的最后一道工序,决定其最终性能。高效、可控的硫化过程在为轮胎安全性能提供保障的同时,又为企业带来可观回报。因此,有必要对轮胎硫化传热特性及其影响规律进行系统研究。

我国轮胎硫化传热特性及影响规律的研究与工业发达国家还有一定的差距,但已引起了研究人员的广泛重视。为了更系统地阐述轮胎硫化传热特性及影响规律,作者在对现有硫化基础建模理论、硫化改进工艺和硫化专用软件等问题进行深刻分析的前提下,将自身近期的科研成果和经验经整理后写成本书。

本书共分为6章,系统地阐述了轮胎硫化传热特性及影响规律、内容包括硫化传热特性及影响规律研究背景、轮胎材料热物性建模、橡胶硫化动力学与硫化反应热、轮胎硫化多场强耦合建模及试验、轮胎硫化传热特性及其影响规律和轮胎硫化专用软件开发等内容。附录中给出了专用软件源代码。作者采用递进的编写思路,把第2、3、4章作为基础理论研究,并以此为基础,编写出第5章的轮胎硫化传热特性及影响规律研究和第6章的专用软件。

本书内容丰富新颖,创新性地提出多维橡胶热物性参数模型、



混合定律模型和混合动力学模型等,同时又给出大量的软件源代码,对轮胎硫化理论的研究与应用有很好的指导意义。

在此感谢江苏大学的王国林教授对本书编写过程中的切实指导,同时感谢风神轮胎有限公司对本书研究工作的资助。

由于作者水平有限,书中存在的不足之处,恳请读者提出宝贵意见。

张 建

2014年7月24日



# CONTENTS

## 目录

第 1 章 概述 .....	1
1.1 背景与意义 .....	1
1.2 关键技术研究与应用现状 .....	2
1.2.1 橡胶热物性参数 .....	2
1.2.2 橡胶硫化动力学特性 .....	4
1.2.3 轮胎硫化理论建模 .....	9
1.2.4 轮胎硫化工艺改进 .....	11
1.2.5 轮胎硫化专用软件开发 .....	14
第 2 章 轮胎材料热物性参数试验及建模 .....	15
2.1 橡胶热物性参数试验 .....	15
2.1.1 橡胶密度测试 .....	16
2.1.2 橡胶比热容、导热系数测试 .....	16
2.2 橡胶热物性参数建模 .....	20
2.2.1 传统热物性参数模型分析 .....	20
2.2.2 多维橡胶热物性参数建模 .....	21
2.3 橡胶-帘线复合材料热物性参数建模 .....	24
2.3.1 橡胶帘线混合定律模型的提出 .....	25
2.3.2 混合定律模型验证 .....	26
2.4 小结 .....	31



第3章	橡胶硫化动力学与硫化反应热 .....	33
3.1	橡胶硫化反应分析 .....	33
3.1.1	橡胶硫化反应发展简述 .....	33
3.1.2	橡胶硫化反应过程 .....	34
3.2	橡胶硫化动力学试验研究 .....	35
3.2.1	硫化动力学试验 .....	35
3.2.2	试验结果分析 .....	36
3.3	橡胶硫化动力学建模 .....	37
3.3.1	焦烧模型选取 .....	37
3.3.2	传统动力学模型分析 .....	38
3.3.3	混合动力学模型建立 .....	39
3.4	橡胶硫化反应热模型及试验 .....	41
3.4.1	硫化反应热模型选取 .....	41
3.4.2	硫化反应热试验 .....	42
3.5	小结 .....	43
第4章	轮胎硫化-传热耦合建模及试验 .....	45
4.1	轮胎硫化数学模型构建 .....	45
4.1.1	子午线轮胎硫化系统简述 .....	47
4.1.2	硫化-传热耦合方程组构建 .....	48
4.1.3	硫化初始和边界条件设置 .....	48
4.2	对流换热系数求解研究 .....	49
4.2.1	计算流体动力学法 .....	50
4.2.2	分区迭代法 .....	54
4.2.3	求解方法对比讨论 .....	55
4.3	硫化数学模型解算思路与实现途径 .....	56
4.3.1	模型解算思路 .....	56
4.3.2	具体实现途径 .....	57



4.4	轮胎硫化测温试验研究 .....	59
4.4.1	测温试验系统简述 .....	59
4.4.2	测温点植入位置选择 .....	60
4.4.3	测温试验具体步骤 .....	61
4.5	测温试验结果分析及模型验证 .....	61
4.6	小结 .....	62
<b>第5章</b>	<b>轮胎硫化传热特性及其影响规律 .....</b>	<b>64</b>
5.1	轮胎硫化传热特性分析 .....	64
5.1.1	温度场分析 .....	64
5.1.2	焦烧分析 .....	66
5.1.3	硫化程度分析 .....	67
5.2	工艺影响规律研究 .....	69
5.2.1	水囊的影响 .....	69
5.2.2	初始温度的影响 .....	71
5.2.3	硫化介质温度的影响 .....	72
5.3	橡胶热物性和硫化动力学影响规律研究 .....	76
5.3.1	正交试验的方案设计 .....	76
5.3.2	橡胶热物性的影响 .....	77
5.3.3	橡胶硫化动力学的影响 .....	79
5.4	小结 .....	81
<b>第6章</b>	<b>轮胎硫化专用软件开发 .....</b>	<b>84</b>
6.1	子午线轮胎硫化工艺简述 .....	84
6.2	轮胎硫化专用软件总体设计思路 .....	85
6.3	轮胎硫化专用软件模块设计与实现 .....	88
6.3.1	信息自动识别模块 .....	88
6.3.2	材料库配置模块 .....	89
6.3.3	模型前处理信息配置模块 .....	90



6.3.4	解算及后处理模块 .....	92
6.3.5	软件使用流程介绍 .....	92
6.4	小结 .....	94
附录 1	轮胎硫化 INP 主体程序代码 .....	95
附录 2	用户子程序 UMATHT 代码 .....	107
附录 3	轮胎硫化专用软件代码 .....	129
参考文献	.....	159



## 第 1 章

# 概 述

### 1.1 背景与意义

近年来,我国轮胎行业发展突飞猛进,产量位居世界第一,已经成为全球第一制造大国。然而,长期以来,由于缺乏对轮胎硫化工艺的深入研究,国内轮胎设计人员大多依据经验或参考相近规格的轮胎来进行硫化设计,通过试错法反复调整设计来保证轮胎的质量,这种方法不但费时费力,而且得到的轮胎性能与设计初衷有很大差距。与国外知名品牌轮胎相比,国产轮胎仍以中低档为主,在生产高技术含量和高附加值的轮胎以及创新技术研发能力方面并没有显著提高,严重阻碍对外出口。

硫化是轮胎制造过程的最后一道工序,在这个极其重要的阶段,水胎在平板硫化机上形成最终理想形状。在硫化机上,热量通过含有高压热水的胶囊和高温蒸汽的金属模具传入轮胎内部,过热水和蒸汽不断循环以保证介质较高的温度(见图 1-1),这些传入的热量促使橡胶化合物发生化学反应,最终形成一种超弹性耐久材料,以满足轮胎的性能要求。从动力学角度讲,轮胎硫化反应本身非常复杂;从经济学角度讲,由于橡胶硫化关联性很高,硫化工艺的恰当与否将会影响轮胎质量及其使用寿命。因此,对轮胎硫化过程进行深入研究不仅有助于制造高质量的轮胎,而且可以节约制造成本。但是,现有研究中,关于轮胎硫化过程中橡胶和橡胶基材料的热物性参数、硫化动力学特性、硫化传热耦合机理及其影响规律等问题的阐述并不清晰。

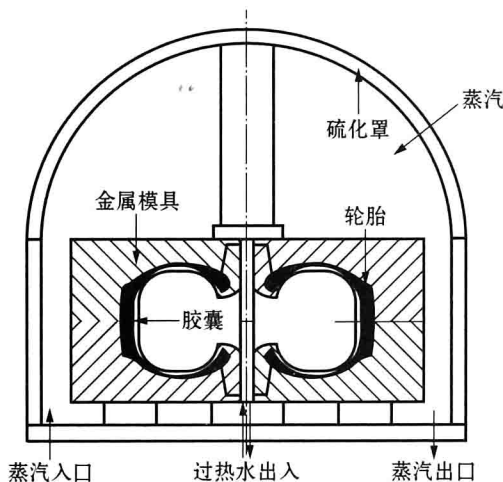


图 1-1 轮胎硫化设备结构示意图

开展轮胎材料热物性、硫化动力学建模理论及硫化传热特性及其规律的研究,不仅对突破轮胎硫化理论研究难点、提高轮胎制造性能和节约成本具有重大意义,而且对提高我国轮胎设计、生产的技术含量和产品附加值、形成自主研发能力等具有重要意义。

## 1.2 关键技术研究与应用现状

### 1.2.1 橡胶热物性参数

橡胶化合物的密度通常随着温度增加而减少,但变化不大;而比热容则随着温度增加而增加,变化比较明显。此外,密度和比热容均依赖于硫化程度,故应同时考虑温度和硫化程度对二者程度的影响。目前,一般采用两种方法来解决此问题:一种方法是把密度与比热容乘积看成常数;另一种方法是假设密度不变,而比热容随着温度和硫化程度变化,如式(1-1)所示,式中  $c_m$ 、 $c_u$  和  $c_c$  分别为部分硫化( $0 < \alpha < 1$ )、未硫化( $\alpha = 0$ )和完全硫化( $\alpha = 1$ )橡胶的比热容,而比热容与温度为线性关系,如式(1-2)所示。在特殊情况下,假设密度和硫化程度关系与式(1-1)类似[见式(1-3)],式中  $\rho_m$ 、 $\rho_u$  和  $\rho_c$  分





别为部分硫化、未硫化和完全硫化橡胶的密度,而各种硫化程度下的密度与温度成线性关系。

$$c_m = c_u(1 - \alpha) + c_c \alpha \quad (1-1)$$

$$c = c_1 + c_2 T \quad (1-2)$$

$$\rho_m = \rho_u(1 - \alpha) + \rho_c \alpha, \rho = \rho_1 + \rho_2 T \quad (1-3)$$

对导热系数与温度关系的研究也有大量成果。Hands 在 1977 年发现橡胶导热系数随着温度增加而呈线性减小。也有研究表明可以把导热系数与温度设为一阶线性反比例关系[见式(1-4)]。1995 年, Naser 通过研究 SBR 的导热系数发现, 橡胶的导热性与其中炭黑类型和含量有很大关系, 有时随着温度增加反而也减小。而 Walker 认为橡胶的导热系数与其硫化过程无关。以上研究都是针对完全硫化橡胶产品开展的。

$$k = \alpha_1 - \alpha_2 T \quad (1-4)$$

Rafei 研究了生胶的导热性能, 认为硫化前后橡胶的导热性能完全不同, 生胶的导热系数起初随着温度升高而增加, 达到一定阈值后随着温度升高而减小, 而完全硫化橡胶的导热系数一直随着温度升高呈线性增加。为此, Rafei 提出了与式(1-1)类似的导热系数表达式, 如式(1-5)所示。

$$k_m = k_u(1 - \alpha) + k_c \alpha \quad (1-5)$$

橡胶导热系数可直接由热传导测试系统测得, 也可以间接通过热扩散系数确定。热扩散系数是橡胶硫化过程的重要参数, 与传热速率成正比。由于测量热扩散系数比直接测量导热系数简单, 因此常使用间接测量法确定导热系数。

可以发现, 在橡胶硫化过程中, 其热物性参数随着硫化程度、温度的变化而改变。然而, 现有热物性参数模型是基于橡胶未硫化和完全硫化两种状态建立的, 无法准确反映橡胶热物性参数的真实变化过程。而对于橡胶-帘线复合材料, 其热物性参数取决于橡胶热物性参数、帘线热物性参数及橡胶-帘线的几何排布方式, 且变化规律更为复杂。为此, 本书拟通过不同硫化状态胶



片热物性参数试验研究,探寻橡胶在硫化过程中热物性参数的变化规律,建立一种合理的橡胶热物性参数模型,并借鉴复合材料混合定律法则,建立适用于本书轮胎硫化传热特性研究的橡胶-帘线热物性参数模型。

## 1.2.2 橡胶硫化动力学特性

硫化动力学模型主要分两类:第一类是机理学模型,通过严格的数学模型来模拟硫化的化学反应过程;第二类是现象学模型,这是一种基于特定函数形式拟合试验数据的退化模型。

### 1) 机理学模型

在橡胶硫化过程中,发生着许多化学反应,非常复杂。建立一个精细的硫化动力学模型,需要充分理解硫化反应机理。由于复杂的动力学模型包含了一系列非线性微分方程,在多数情况下需要对其进行合理的假设和简化以获得一个简单的数值解。

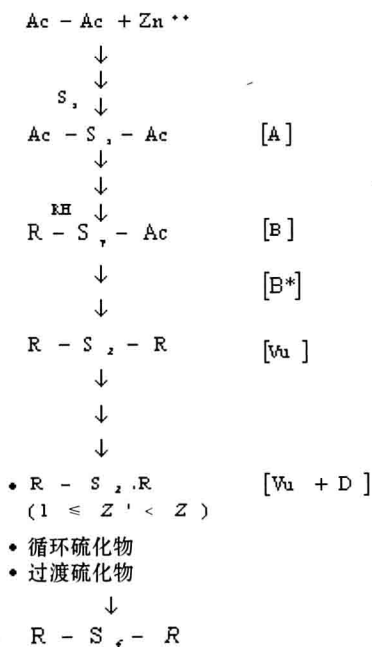


图1-2 硫化过程中的主要化学反应

橡胶硫化机理研究开始于1946年,到20世纪60年代,相关学者对硫化反应机理做了大量研究,Bateman 对其进行了综述。Krejsa 和 Koenig 认为硫化反应主要分为活化剂和促进剂反应,生成活化促进剂、硫化剂和橡胶反应,生成可交联前体、可交联前体变成多硫交联键,以及形成三维网状结构这四个阶段(见图1-2)。Krejsa 指出在第四阶段至少发生了交联、脱硫和分解这3个化学反应,这些反应不仅与温度有关,而且取决于促进剂的类型和浓度。

Ghosh 针对天然橡胶提出了一套包含111种反应物的综合模型。而在大多数研究中,只考虑硫化过程中非常重要的化合



物。Coran 根据质量守恒原理提出一种橡胶硫化模型,模型包含硫化反应物 A、硫化前体 B、活化硫化前体  $B^*$  和最终硫化产品 Vu 这 4 种反应物,反应机理如式(1-6)和式(1-7)所示。式(1-6)是硫化反应的基本方程,式(1-7)用来模拟试验结果,当速率常数  $K_4$  足够大时,可以认为在交联反应开始(焦烧期)之前所有加速剂已经参与反应。Ding 在此基础上引入了竞争性反应来描述高温下最终硫化产品浓度下降现象[见式(1-8)],而后 Ding 又增加了一个返硫反应方程,如式(1-9)所示。



由式(1-6)至(1-9)可以推导出下述 5 个非线性耦合微分方程:

$$\begin{cases} dA/dt = -k_1 A - k_4 AB^* \\ dB/dt = k_1 A - k_2 B + \beta k_4 AB^* \\ dB^*/dt = k_2 B - k_4 AB^* - (k_3 + k_5) B^* \\ d(Vu/\alpha)/dt = k_3 B^* - (1/\alpha) k_6 Vu \\ d(D/\gamma)/dt = k_5 B^* + k_6 Vu \end{cases} \quad (1-10)$$

式 1-10 中, A、B、 $B^*$ 、Vu 和 D 是化合物的浓度,系数  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  是化学方程式系数。对化合物 A 采用非零初始条件,其他化合物采用零初始条件,由此求解这 5 个非线性方程。Abhilash、Nozu 和 Ding 应用此硫化动力学模型进行了橡胶硫化研究。

## 2) 现象学模型

现象学模型是一种宏观动力学模型,在 20 世纪 70 年代开始出现。图 1-3 为典型橡胶硫化曲线(转矩—时间曲线),主要分为三大阶段:首先是焦烧期(诱导期),此时转矩基本保持不变;接着转矩突然升高,进入硫化阶段,转矩

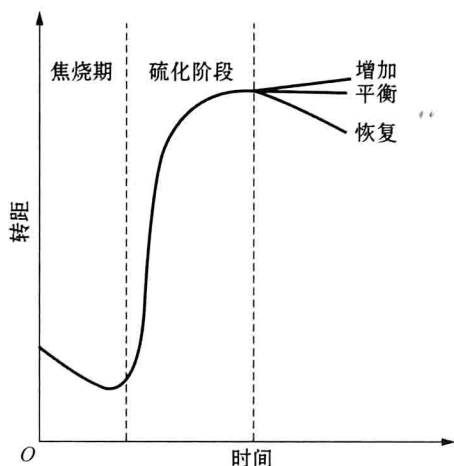


图 1-3 经典硫化转矩曲线

曲线斜率上升,经过拐点后,转矩以一阶线性方程形式呈线性增加,直至达到最大值;最后,若发生返硫反应,转矩保持恒定不变(在某些情况下也会继续上升),否则由于高分子结构退化和交联键破裂,转矩将下降。Redding 通过实验证明,硫化转矩变化值与交联密度呈线性关系,因而可以用转矩变化值来表示交联密度或硫化程度。

#### (1) 焦烧期。

焦烧时间取决于胶料的配方成分(主要受促进剂影响),其长短关系到轮胎生产加工的安全性。此外,胶料的温升历程也是一个重要因素。由于橡胶具有热累积性,故实际诱导时间包括操作诱导时间和剩余诱导时间。其中,操作诱导时间是指轮胎橡胶加工过程中由热累积效应消耗的诱导时间,与炼焦、成型等工艺条件有关;剩余诱导时间是指轮胎在平板硫化机中加热时橡胶保持流动性所消耗的时间。在轮胎研究过程中,用于动力学试验的胶料直接从加工后的轮胎半成品部件中截取,因此不考虑操作诱导时间的影响。

对于等温硫化,Claxton 和 Liska 提出了 Arrhenius 函数描述诱导时间与温度的关系,如式(1-11)所示。式中的  $t_0$  和  $T_0$  为两个材料常数,另外一个描述等温硫化的模型由 Karan 提出,如式(1-12)所示。

而对于非等温硫化,Isayev 和 Deng 把诱导时间用无量纲参数  $\bar{t}$  描述[见式(1-13)]。式中,  $t_i$  是等温硫化时间,当  $\bar{t} < 1$  时,硫化处于焦烧期,否则硫化反应开始。

$$t_i = t_0 \cdot \exp(T_0/T) \quad (1-11)$$

$$\ln(t_i) = t_0 \cdot \exp(T_0/T) \quad (1-12)$$

$$\bar{t} = \int_0^t \frac{dt}{t_i(T)} \quad (1-13)$$



## (2) 硫化阶段。

在硫化阶段,橡胶开始发生化学反应,由线性大分子结构通过化学交联形成三维网状结构。一些学者将硫化曲线定义为  $n$  阶方程,如式(1-14)所示。式中,  $k$  为 Arrhenius 表达式,下同;如果  $n = 1$ , 此模型就退化为一阶动力学模型。但此方程过于简单,无法描述转矩曲线斜率上升现象。

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1 - \alpha)^n \quad (1-14)$$

$$k = k_0 e^{-\frac{E}{RT}} \quad (1-15)$$

式中,  $\alpha$  为硫化程度,  $n$  为反应的阶数,  $k_0$  为频率指数,  $E$  为活化能,  $R$  为气体常数,  $T$  为温度。

Piloyan 于 1966 年提出了一种相对复杂的模型[见式(1-16)]。式中,  $m$  和  $n$  是代表反应阶数的常数,并由 Isayev 和 Deng 在 1988 年引入到橡胶硫化反应研究中,后得到广泛应用。

$$\frac{d\alpha}{dt} = k\alpha^m(1 - \alpha)^n \quad (1-16)$$

在此基础上, Kamal 和 Ryan 建立了基于两个参数和两个速率常数的模型[见式(1-17)],可以有效预测环氧树脂和聚酯在注射成型中的硫化状态。

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2\alpha^m)(1 - \alpha)^n \quad (1-17)$$

然而,上述模型无法给出硫化程度的显式表达式,为了克服这个缺陷, Kamal 和 Sourour 提出了 K-S 硫化模型, Ghoreishy 基于 K-S 模型分别进行了橡胶-金属试样和轮胎的硫化仿真。但此模型不能精确预测硫化初期橡胶的硫化程度,为此, Rafei 提出了修正 K-S 模型[见式(1-18)],用于模拟 NR/BR 材料的硫化过程,并进行了试验验证,计算结果表明修正 K-S 模型可以精确模拟橡胶件的初期硫化过程。

$$\alpha = \frac{kt^n}{1 + kt^n} \quad (1-18)$$

## (3) 两种模型比较。



机理学模型需要充分理解硫化反应机理,它具有明确的物理意义。此模型从整体角度模拟硫化进程,直接把加工条件、产品结构和材料性能与配方设计联系起来,可以融入到动介质的化学反应加工仿真中。但是,方程要求非常严格,在数学建模过程中存在许多困难,尤其对于那些非常复杂且缺少对反应机理认识的问题。而现象学模型忽略了硫化化学反应的细节,仅由试验数据拟合出动力学方程。这种模型是较为实用的硫化动力学模型,本书选用现象学模型来研究轮胎硫化仿真。

#### (4) 动力学参数试验。

测量橡胶硫化动力学参数的方法主要包括溶胀法、拉伸模量法、示差量热法(DSC)、应力松弛法以及化学分析法,这些方法的原理是测量游离硫消失速率或交联键类型变化速率。由于橡胶硫化热函非常低,使用上述方法测量比较麻烦。考虑到橡胶硫化程度与其物理性能之间的相关性,可通过控制恒温硫化过程中试样的黏度或者转矩来研究橡胶的硫化动力学特性。为此,出现了 Mooney 黏度计、Wallace-Shawbury 硫化计、摆动转盘硫变仪(ODR)、橡胶加工分析仪(RPA)和无转子流变仪(MDR)等相关设备。其中,MDR 和 RPA 应用较为广泛,但是动力学模型参数的拟合精度与橡胶配方、动力学模型形式以及测试设备之间匹配的良好性有关。

振荡盘式流变计(ODR)是一项测量结构不断变化的材料剪切模量的技术。利用稳定性理论,通过测量剪切模量来估算橡胶的交联密度。实现 ODR 的设备是基于  $\alpha$  技术橡胶加工分析仪 RPA2000,它可以改变转盘摆动的幅度、频率以及试样随时间变化的温度。RPA2000 的基本结构是:下模固定上模摆动,试样形状和模腔形状都是双锥线盘状,圆锥角非常小。这样,盘状结构的径向应变就会是常数。

硫化程度  $\alpha$  可用硫化转矩曲线获得:

$$\alpha = \frac{M_t - M_i}{M_h - M_i} \quad (1-19)$$

式中,  $M_i$ ,  $M_t$ ,  $M_h$  分别为焦烧结束时的转矩、热硫化阶段的转矩以及最大扭矩。

可以发现,对于不同配方的橡胶,硫化程度随时间、温度的变化规律是不



同的,而现有硫化动力学模型无法适用于多种胶料在硫化全过程中硫化程度随时间、温度的变化规律。为此,本书拟通过橡胶硫化动力学试验测得不同温度下橡胶的硫化转矩—时间曲线,根据试验数据,采用 K—R 动力学模型及修正 K—S 动力学模型描述橡胶硫化动力学特性,并运用数值标定和欧拉迭代法处理试验数据,从而建立一种分段函数形式的动力学模型,精确描述橡胶在硫化全过程中硫化程度随时间、温度的变化规律。

### 1.2.3 轮胎硫化理论建模

与其他材料(如金属)相比,橡胶的热扩散系数非常低,轮胎内部每一点的温度历程都不一样,导致温度和硫化程度分布不均,简单的等温硫化曲线已经不能被用来评价橡胶的硫化程度。可以使用两种方法解决此问题,一种是通过热电偶测出轮胎内部关键点处的温度历程,如胎肩、胎冠和胎圈等较厚的地方,再应用合理的动力学模型把各点温度转化为硫化程度,以此确定硫化的必要时间。但配方设计和边界温度的改变将影响硫化反应过程,进而影响橡胶的最终硫化程度和机械性能。而且每次试验后,必须把轮胎割开,找出热电偶的位置,因此,成本高、时间长。另一种方法是基于计算机仿真的数值技术,可以预测出轮胎内部每一点的温度和硫化程度,有助于减少轮胎开发成本和缩短研发周期。

早在 1967 年,Gehman 首次提出了使用数值技术研究橡胶硫化的思想。Ambelang 和 Prentice 首次应用计算机程序通过有限差分法预测了轮胎胎肩橡胶的硫化温度和反应动力学性能。Prentice 和 Williams 在此基础上,针对某充气轮胎硫化建立了一套更加真实的数值模型,该模型包括水囊和金属模具,并结合二维传热方程和硫化程度计算公式,应用有限差分法分析了在硫化机内加热阶段和在空气中冷却阶段胎肩区的硫化传热特性。

Schlanger 把复杂轮胎断面简化为一个等效橡胶片,基于一维传热模型研究了轮胎硫化传热过程。Isayev 联合运用有限元法和有限差分法研究了橡胶的注塑成型过程,确定了橡胶各个部位的硫化程度,有限元法用来求解材料流动方程,有限差分法用来求解能量方程。Nazockdast 使用有限差分技术来求解传热和硫化动力学方程,模拟了传输带的连续硫化过程。



鉴于轮胎自身结构和硫化过程的复杂性,有限元法(FEM)能更加精确和全面地研究轮胎硫化。Janata 最早建立了轮胎硫化过程的二维轴对称 FE 模型,假设轮胎为同一种各向同性材料,研究了金属模具的温度场,由于网格设计和计算时间的限制,模型的网格数较少。Toth 使用 FE 技术首次模拟了轮胎的硫化过程并研究了初始温度对硫化的影响,使用 ABAQUS 软件结合其用户子程序 HETVAL,建立了轮胎传热-硫化耦合模型;使用无转子流变仪(MDR)研究橡胶的硫化动力学性能,并考虑了热物性参数的变化。但模型不包括胶囊和金属模具,仿真的边界条件由设在轮胎-胶囊和轮胎-模具接触面上的热电偶提供。后来,Marzocca 建立了一维 FE 模型来模拟橡胶圆柱体的硫化过程。Han 建立了在平板硫化机上轮胎硫化的二维轴对称模型,使用自己开发的软件求解系统方程,模型考虑了轮胎几何结构的复杂性、金属模具和胶囊、时变边界条件、加热和冷却过程以及复杂的动力学模型。之后,Han 使用这个模型优化了轮胎硫化工艺。Greenwell 建立了包含轮胎、金属模具和胶囊的二维轴对称 FE 模型以及三维 FE 模型,研究了传导和对流两个传热机理、硫化模具之间的热阻、加热阶段和冷却阶段等关键问题,并通过改变轮胎结构尺寸降低了 12% 的硫化时间。2002 年,Pirelli 公司公开申请了专利“模拟轮胎硫化程度的方法”,但不能计算三维轮胎。

Ghoreishy 使用 HSTAR 软件建立了一套完整的轿车轮胎硫化的二维轴对称模型。其中,硫化动力学方程由自编软件求解,模型包括胶囊和金属模具。Ghoreishy 认为不考虑热量的轴向流动将导致所预测的温度和硫化程度误差很大,尤其当轮胎花纹非常复杂时。Rafei 运用 ABAQUS 软件结合 UMATHT 用户子程序研究了橡胶硫化过程中的若干关键问题,研究了导热系数和比热容与温度和硫化程度的变化关系,建立了更加精确的硫化动力学模型,在冷却阶段加入了对流和辐射边界,最后直接通过硫化程度验证仿真结果。此外,闫相桥等国内学者在轮胎硫化方面也做了大量工作,发表了很多轮胎硫化有限元仿真的相关文章。尽管轮胎硫化数值技术得到了如此广泛的应用,目前在处理橡胶热物性参数、橡胶硫化动力学、橡胶-帘线热物性参数等问题上存在很多缺陷。

可以发现,已有的硫化数值模型中硫化程度计算与传热计算大多以顺





序耦合的方式进行,且较少关注轮胎在空气中的对流换热影响,建模时多使用传统的热物性参数模型与硫化动力学模型,这使得硫化数值模型的求解精度受限。本书拟基于材料热物性和硫化动力学的研究成果,建立轮胎硫化过程的硫化-传热强耦合模型,包括控制方程、初始条件和边界条件;针对后硫化阶段中轮胎与空气对流换热系数这一边界条件的取值问题,采用CFD法和分区迭代法进行对比研究;最后,研究数学模型的求解策略及其实现途径。

#### 1.2.4 轮胎硫化工艺改进

轮胎硫化工艺改进主要有3种方法:第一种从边界条件出发,改变轮胎硫化温度场、采用微波硫化及水胎预热等技术;第二种从结构出发,使用实心体代替胶囊和无胶囊硫化等方法;第三种从配方出发,开发新材料和配置合适的加速剂放入微型胶囊中。

##### 1) 边界条件

通过改变硫化温度场来控制硫化反应速度。根据“Van't Hoff”法则,温度提高 $10^{\circ}\text{C}$ ,硫化速度加快2倍。但是,随着硫化温度提高,橡胶聚合物发生化学反应形成无意义的共轭环,导致轮胎不同部位的橡胶件发生返硫,返硫使得分子链退化和产品的最终性能下降。因此,选择合适的硫化温度场是保证硫化质量的前提。

(1) 通过微波硫化加快传热速度并使轮胎受热均匀,再配合硫化程度监控技术来提高硫化产品质量。传统硫化是把热量从轮胎外部传递到内部,速率很慢。而橡胶中的各种添加剂(如炭黑)对微波辐射起到促进作用,加快了热量传递。此外,微波硫化给轮胎断面上提供了均匀热量。自19世纪80年代以来,研究利用微波硫化橡胶和其他聚合物材料的技术取得了很大的进步,因此微波硫化用于轮胎行业只是时间问题。硫化程度的监控技术是轮胎行业的另一个巨大应用,其基本原理是通过建立橡胶的非导电性与其橡胶硫化程度和黏度的定量关系来实现硫化程度的实时监控。J. M. Catala-Civera利用2450 MHz的发生器把信号反馈给计算机控制系统,通过对橡胶硫化温度的控制,来自动调整微波输入能量直至试样达到理想温度。使用这种方法



硫化轮胎可以缩短硫化周期(尤其适用于厚断面的大型轮胎),消除水管能量供给损耗,使硫化程度更加均匀和所需模具压力小。

(2) 通过水胎预热来提高轮胎硫化效率,增加产量。轮胎成型组装之后,通常要存放几个小时准备硫化,此时水胎将达到环境温度( $25^{\circ}\text{C}$ )。当水胎进入平板硫化机时,最终橡胶要达到一定温度才能发生交联反应,因此不管硫化多快,加热轮胎内部都有一个初始滞后。Kobelo Stewart Bolling 公司引入了一套水胎预热系统来解决上述问题。在放入平板硫化机之前,这套系统把水胎预热到  $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。该技术减少了硫化时间并使轮胎硫化内外温差降低,硫化程度更加均匀。而且轮胎黏度降低减少了模塑缺陷。

(3) 通过直接加热模具法降低硫化能耗。传统硫化过程效率很低,能耗大。于是日本神户轮胎开发了一种硫化机,利用直接加热钢模技术硫化轿车胎。钢模的上下端由中空平面压板加热,压板内部设有环形加热体,每一块压板都有自己的局部加热器和控制器。环形加热体由电能加热,尽管加热效率没有水蒸气高,但不存在环源和相应管道供热的热损失。单个电加热单元装载每块钢模背面上,通过单独控制这些单元来给轮胎各个部件提供热量。内部的胶囊和传统方法一样把轮胎紧贴在模具上,但不是采用传统的隔热丁基橡胶材料,而是由聚合物、金属网、炭黑和 POB 组成的复合材料。这种材料耐久性好,内生热均匀。胶囊加热由一个诱导加热线圈提供。此外, ThermoCeramik 公司开发了另一种轻快的电阻套,可以在任何平板上直接加热板的表面,主要优点也是不存在环源和相应管道供热的热损失。

## 2) 结构

(1) 通过使用实心体代替胶囊来保证轮胎成品质量,降低成本。在传统硫化过程中,硫化胶囊对轮胎内部加压使轮胎与钢模紧紧贴合,同时以蒸汽的形式把热量从胶囊内侧传到轮胎的内表面。这个过程存在很多缺陷,例如胶囊无法保证施加在轮胎内侧压力均匀。因此,米其林和倍耐力轮胎公司使用了一个实心加热体来代替胶囊。实心体本身由可折叠的部分组成,水胎在这个实心体上制造,实心体紧贴在水胎内表面上并通过电能加热。这种方法可使水胎最终形状更加均匀连续,能量利用率更高,而且减少了模具缺陷和胶囊更换保养费用。



(2) 通过无胶囊硫化法同样也能解决如前所述的采用胶囊对轮胎硫化带来的问题和缺陷。米兰的 Pireli 就采用了预成型元件代替胶囊, 这个系统的优点是: 无需更换和保养胶囊, 降低了制造成本; 过热水快速把热量传给轮胎, 降低了硫化时间。根据经验, 胶囊厚度每增加  $3\sim 4\text{ mm}$ , 传热时间将延长  $2\sim 3\text{ min}$ 。

### 3) 配方

(1) 通过开发新材料减少橡胶件返硫现象。轮胎不同部位的橡胶件返硫是由于硫化温度提高造成的, 进而分子链退化导致产品质量下降。为此, 从基本化学和动力学反应角度应用了很多措施来克服上述缺陷。例如, Flexsys 公司开发了两种新材料“Perkalink 900”和“Duralik”来防止返硫时材料性能退化。

(2) 通过加入加速剂和活化剂可以控制硫化曲线的形状。一条理想的硫化曲线应该具有如下特征: 升温迅速, 黏度低以减小能耗, 诱导期稳定, 自始至终反应率非常高, 以及橡胶稳定性好或无返硫。把加速剂放入微型胶囊里可以实现上述想法。这种技术早已用于药品和化肥行业中, 但颗粒比较大。在轮胎行业, 最大挑战是让颗粒足够小, 以便混合均匀。

(3) 通过提高橡胶的热扩散系数提高硫化效率。针对轮胎硫化效率问题的研究很多, 主要有: 加快硫化动力学反应速度, 改变生产过程, 使轮胎在短时间内获得更多能量。但最根本的阻碍仍然是橡胶的低导热性。除了用微波直接加热外, 其他硫化工艺仍需依靠热量在水胎内部传导来完成硫化过程。制约水胎加热、冷却效率的主要因素是热扩散系数, Bafrnec 通过试验来调整橡胶试样的热扩散系数。总共测试了 19 种试样, 这些试样都是用于制造轮胎的弹簧填充聚合物, 得出炭黑含量和炭黑颗粒形状是影响橡胶热扩散系数的主要因素。此外, El - Tantawy 还研究了  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  对橡胶交联效率的影响。

可以发现, 在硫化过程中, 轮胎内部橡胶的温度、焦烧和硫化程度等参数分布具有明显的不均匀性和时变性, 其硫化规律直接影响到轮胎硫化工艺设计, 如工程正硫化时间、初始温度、硫化介质温度的确定等。由于缺乏合理材料模型, 通过理论算出的硫化传热特性参数与实际差别较大, 很难直接用于



指导轮胎硫化工艺设计,且由于缺乏对硫化传热特性影响规律的研究,导致轮胎硫化工艺设计具有很强的盲目性和随机性。为此,本书拟通过数值分析和试验研究,探寻硫化传热特性参数的变化规律;分析水囊、初始温度、介质温度、材料参数对硫化传热特性的影响规律。

### 1.2.5 轮胎硫化专用软件开发

前人在进行轮胎硫化理论建模研究的同时,往往也开发出相应的轮胎硫化专用软件,对方程求解等复杂运算进行封装,给出友好和高效的人机交互界面。

White 开发了一款模拟轮胎硫化过程的商业软件 VACAM-LAB,利用瞬态温度场 FE 技术计算产品在升温和降温过程中的温度变化的不均匀性,软件可以计算轮胎各处材料的硫化程度。Ghoreishy 和 Naderi 深入研究了硫化过程的三维 FE 技术,建立了仿真橡胶硫化的三维有限元模型,并基于 Visual Basic 开发了模拟具有复杂形状橡胶件和卡车轮胎硫化的专用软件。

国内在硫化专用软件开发方面鲜见报道,研究内容更多地集中在轮胎硫化过程监控软件上。

可以发现,目前轮胎硫化过程模拟主要采用专用程序和通用有限元程序,需要设计人员花费大量精力学习有限元理论或软件操作。专用程序建模专业化程度高,但求解效率、精度和后处理便捷性均低于通用有限元程序;通用有限元程序前、后处理功能强大,求解效率、精度高,但是材料模型不完善,往往需要二次开发。为此,本书在分析子午线轮胎硫化工艺特点的基础上,结合全钢子午线轮胎硫化过程的研究成果,综合专用程序和通用有限元程序的优点,基于 Visual Basic 编程语言进行轮胎硫化专用软件开发,定制专业人机交互界面,使工程技术人员更专注于轮胎产品的研发与改进。



## 第 2 章

# 轮胎材料热物性参数试验及建模

热物性参数主要包含密度、比热容和导热系数。在硫化过程中,橡胶热物性参数会随着硫化程度、温度的变化而改变,而现有的橡胶热物性参数模型无法准确地反映橡胶热物性参数的真实变化过程;而对于橡胶-帘线复合材料,其变化历程更为复杂,关于这方面的研究较少。为此,本章结合未硫化、部分硫化及完全硫化这 3 种状态下的橡胶热物性试验数据,建立一种能够更加精确描述橡胶热物性参数变化的多维模型;借鉴复合材料混合定律法则,提出了一种混合定律模型来描述橡胶-帘线复合材料的热物性参数变化规律。

15

### 2.1 橡胶热物性参数试验

本章研究对象为某全钢子午线轮胎,该轮胎使用的胶料主要有 7 种: TVPA、TMD、ALT、THC、BASE、ANN 和 BACI,分别对应于下三角胶、上三角胶、胎侧胶、胎肩胶、胎面基部胶、带束层胶和冠中心胶。试验样本如图 2-1 所示。由于这些胶料的测试过程相同,因此以下以 TMD 为例,详细介绍橡胶热物性参数的测试过程。

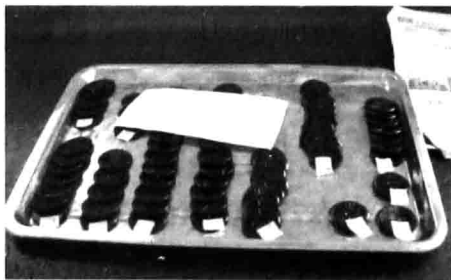


图 2-1 子午线轮胎中主要胶料试样



### 2.1.1 橡胶密度测试

现有研究表明,橡胶密度在硫化过程中基本保持不变,因此,仅选取完全硫化橡胶作为测试对象。本章采用梯形密度柱法测量橡胶样本的密度。梯形密度柱法是一种利用悬浮法原理测定密度的测试方法,它将两种不同密度的液体进行适当的混合,由于扩散作用,混合液的密度从底部到上部会逐渐减小,并且连续分布,再将试样放入到密度梯度管中,待其达到平衡后,可以确定试样的密度为在平衡位置处的液体密度;橡胶密度测试过程如图 2-2 所示,各胶料的密度测试结果如表 2-1 所示。由试验结果可知,7 种橡胶的密度相差不大,均在 $1100\text{ kg/m}^3$ 左右。



图 2-2 橡胶密度测试  
(a) 待测试样 (b) 测试过程

表 2-1 子午线轮胎中主要胶料的密度( $\text{kg/m}^3$ )

样本	TVPA	TMD	ALT	THC	BASE	ANN	BACI
密度	1199	1093	1162	1094	1133	1164	1135

### 2.1.2 橡胶比热容、导热系数测试

#### 1) 橡胶比热容、导热系数测试原理

根据国家标准《GB/T 22588 - 2008 闪光法测量热扩散系数或导热系数》,采用德国耐驰公司生产的 LFA447 型激光扩散法导热仪对橡胶比热容和扩散系数进行测试;其测试原理如图 2-3 所示。测试时将样品放入测试系统



中,通过氙气灯(加热源)发射一束脉冲,直接打在试样下表面,由红外探测器测量试样上表面的相应温升,系统自动计算出试样的热扩散系数。橡胶比热容的测量是通过比较橡胶样品的实际温升与确定比热容的标样温升计算得到的。

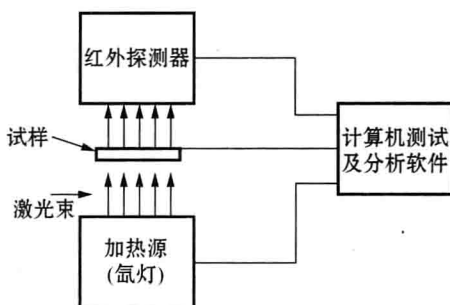


图 2-3 激光扩散导热仪测试原理

LFA447 型激光扩散法导热仪采用红外检测器,进行非接触式的样品表面温升信号测试,主要技术参数如下:温度范围为  $RT \sim 300^{\circ}\text{C}$ ,氙灯能量为  $10\text{J/pulse}$ 且功率可调,热扩散系数范围为  $0.01 \sim 1000\text{ mm}^2/\text{s}$ ,导热系数范围为  $0.1 \sim 2000\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,样品直径为  $12.7\text{ mm}$ 、厚度为  $1\text{ mm}$  或  $2\text{ mm}$ 。

如图 2-3 所示,氙灯热源的发射脉冲照在橡胶试样下表面,同时采用红外探测器测试该试样上表面的温度随时间的变化历程  $T-t$ 。由于橡胶是热的不良导体,热扩散系数较低,因此采用 Degiovanni 模型计算橡胶试样的热扩散系数。

对  $T-t$  曲线进行积分计算,即

$$m_0 = \int_{t_{10}}^{t_{80}} T_{(t)} dt \quad (2-1)$$

$$m_{-1} = \int_{t_{10}}^{t_{80}} T_{(t)} / t dt \quad (2-2)$$

在一定的范围内  $m_0$  与  $m_{-1}$  之间有一定的关联,即

$$m_0 = (d^2/\alpha) F_{m_{-1}} \quad (2-3)$$

式中,  $F_{m_{-1}}$  是  $m_{-1}$  的多项式函数,其系数由 Degiovanni 推导而得; $d$  为橡胶试



样厚度,  $\alpha$  为橡胶的热扩散系数。 $m_0$  与  $m_{-1}$  可以由式(2-2)、式(2-3)根据上述试验结果计算而得, 在根据式(2-3)即可得出  $\alpha$ 。

橡胶比热容测试是根据被测试样温升曲线和同比条件下标准试样的温升曲线相比较来确定的, 假定光脉冲能量与所照到试样上的强度在不同的试样间保持恒定, 即满足

$$mc_P\Delta T = m_s c_{Ps}\Delta T_s \quad (2-4)$$

式中,  $m_s$ 、 $c_{Ps}$ 、 $\Delta T_s$  分别为标准试样的质量、比热容和温差,  $m$ 、 $c_P$ 、 $\Delta T$  分别为待测试样的质量、比热容和温差。上式两边同除以  $m\Delta T$ , 则可以求出橡胶的比热容  $c_P$

$$c_P = \frac{m_s c_{Ps} \Delta T_s}{m \Delta T} \quad (2-5)$$

结合上述试验获得的  $c_P$  和  $\alpha$ , 以及由梯形密度柱法的橡胶密度  $\rho$ , 可以计算出橡胶的导热系数

$$k = c_P \alpha \rho \quad (2-6)$$

## 2) 橡胶样本制作流程及试验设备

制备不同硫化状态橡胶试样的过程如下:

(1) 通过等温 RPA 硫化动力学试验, 确定橡胶硫化转矩曲线, 进而确定该试验温度条件下制备不同硫化状态的橡胶试样所需硫化时间。

(2) 根据上一步确定的硫化时间, 制备未硫化橡胶、硫化程度为 0.5 和完全硫化橡胶等 3 种试样, 硫化模具如图 2-4(a) 所示、硫化设备和橡胶试样如图 2-4(b) 所示。

## 3) 试验结果分析

利用 LFA447 型激光扩散法导热仪, 测得 TMD 橡胶在未硫化、硫化程度为 0.5 及完全硫化这 3 种状态下的比热容随温度的变化关系, 如图 2-5(a) 所示。橡胶在 3 种硫化状态下的比热容均随着温度的增加而线性增加; 在 3 种硫化温度下, 比热容随着硫化程度的增加先减小而后缓慢增大, 而并不是像式(1-1)所定义的那样, 比热容与硫化程度之间为简单线性关系。



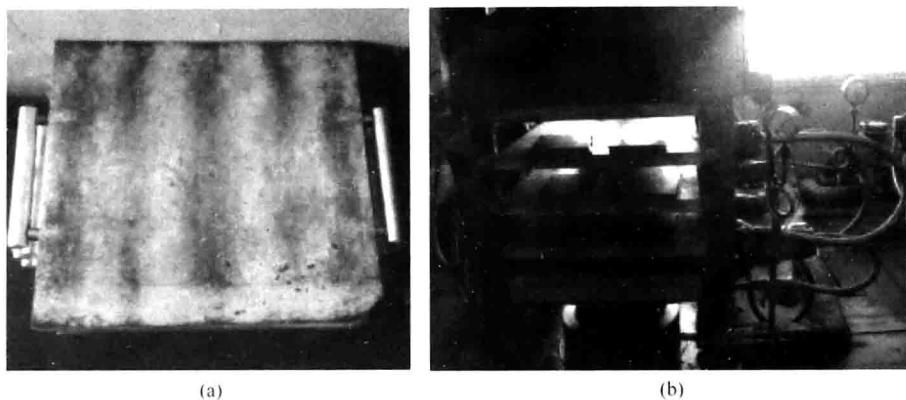
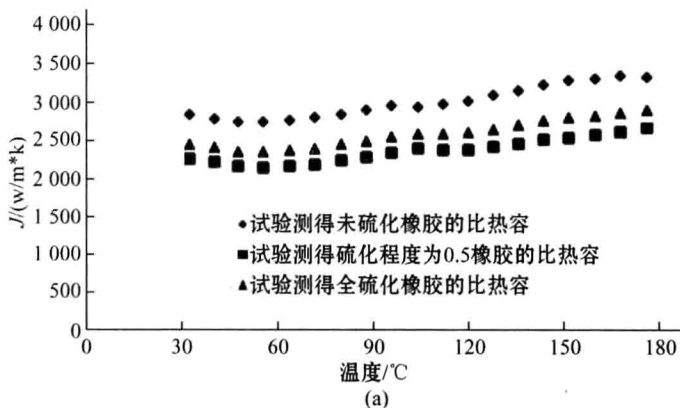


图 2-4 不同硫化状态橡胶试样制备的试验装置

(a) 硫化模具 (b) 硫化设备和橡胶试样

图 2-5(b)为该橡胶未硫化、硫化程度为 0.5 及完全硫化这 3 种状态下的导热系数随温度的变化关系,未硫化橡胶导热系数先是随着温度增加而线性增加,之后随着温度增加而线性减小;硫化程度为 0.5 橡胶和完全硫化橡胶的导热系数则随着温度增加而线性增加;不同硫化状态的橡胶导热系数之间无明显的数学关系,同样说明了式(1-4)所定义的导热系数和硫化程度关系与实际情况存在差距。其他 6 种胶料的比热容和导热系数的变化趋势与 TMD 类似,即不同硫化状态橡胶的比热容和导热系数均随着温度呈线性或分段线性的变化关系,部分硫化状态橡胶的热物性参数与完全硫化橡胶和未



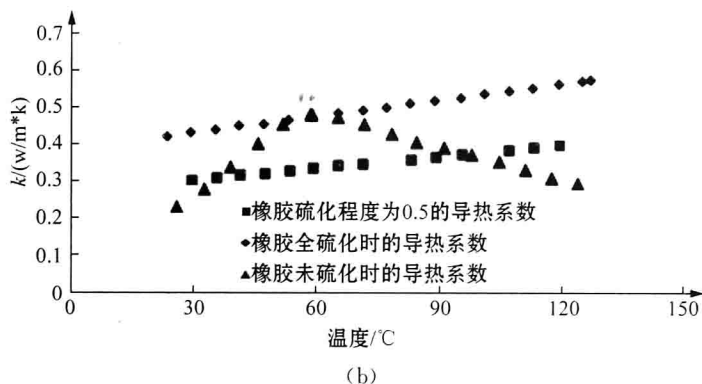


图 2-5 橡胶比热和导热系数的试验结果

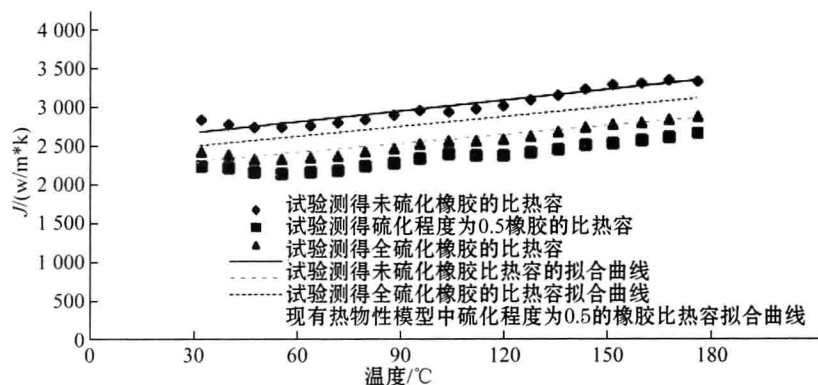
(a) 比热容 (b) 导热系数

硫化橡胶的热物性参数之间没有严格的线性关系,换言之,现有热物性参数模型无法准确地反映橡胶热物性参数的真实变化过程。

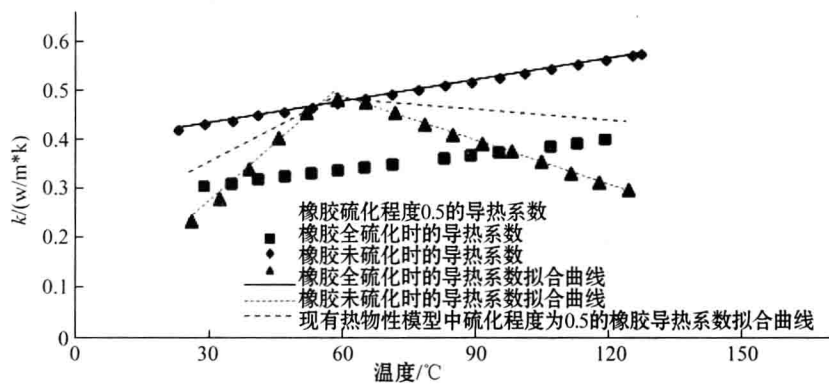
## 2.2 橡胶热物性参数建模

### 2.2.1 传统热物性参数模型分析

采用式(1-2)和式(1-4)对 2.1 节试验结果数据进行分析,即对橡胶未硫化和完全硫化状态下的比热容和导热系数进行线性拟合,并采用现有热物性参数模型[见式(1-1)和式(1-5)]描述该橡胶在硫化过程中比热容和导热系数随着温度和硫化程度的变化关系,分析结果如图 2-6 所示。图 2-6 中,完全硫化和未硫化橡胶的比热容和导热系数结果是通过数据拟合直接得出,而硫化程度为 0.5 的比热容和导热系数结果则分别由式(1-1)和式(1-5)计算所得。由图 2-6 可知,现有热物性模型所描述的硫化程度为 0.5 的橡胶热物性参数与试验结果存在较大差异,显然该模型不能够有效地模拟橡胶在硫化过程中比热容和导热系数随着温度和硫化程度的变化规律。



(a)



(b)

图 2-6 现有热物性模型与试验结果的对比

(a) 比热容 (b) 导热系数

## 2.2.2 多维橡胶热物性参数建模

由上一节的分析可知,现有橡胶热物性参数理论模型仅考虑了橡胶的未硫化和完全硫化两种状态,而没有考虑中间硫化状态的影响。为此,本章提出了一种新的模型来描述橡胶在硫化过程中导热系数和比热容随着温度和硫化程度变化情况,即橡胶导热系数和比热容多维模型,如式(2-7)和式(2-8)所示:



$$k = \sum_{i=1}^n \left( \prod_{j=1, j \neq i}^n \frac{\alpha - \alpha_j}{\alpha_i - \alpha_j} \right) k_i, \quad n \geq 3, \quad (2-7)$$

$$k_i = \begin{cases} a_{i1} + b_{i1}T, & T \geq T_0 \\ a_{i2} + b_{i2}T, & T < T_0 \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中,  $k$  为瞬时导热系数,  $k_i$  为硫化程度为  $\alpha_i$  时橡胶的导热系数, 即  $k_1$  为未硫化橡胶的导热系数,  $k_n$  为完全硫化橡胶的导热系数,  $k_i (1 < i < n)$  为半成品橡胶的导热系数,  $\alpha$  为橡胶的硫化程度,  $T$  为温度,  $T_0$ 、 $a_{i1}$ 、 $b_{i1}$ 、 $a_{i2}$  和  $b_{i2}$  是由试验确定的常数。

$$c_P = \sum_{i=1}^n \left( \prod_{j=1, j \neq i}^n \frac{\alpha - \alpha_j}{\alpha_i - \alpha_j} \right) c_{Pi}, \quad n \geq 3, \quad (2-8)$$

$$c_{Pi} = \begin{cases} c_{i1} + d_{i1}T, & T \geq T_0 \\ c_{i2} + d_{i2}T, & T < T_0 \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中,  $c_P$  为瞬时比热容,  $c_{Pi}$  为硫化程度为  $\alpha_i$  时橡胶的比热容, 即  $c_{P1}$  为未硫化橡胶的比热容,  $c_{Pn}$  为完全硫化橡胶的比热容,  $c_{Pi} (1 < i < n)$  为半成品橡胶的比热容,  $\alpha$  为橡胶的硫化程度,  $T$  为温度,  $T_0$ 、 $c_{i1}$ 、 $d_{i1}$ 、 $c_{i2}$  和  $d_{i2}$  是由试验确定的常数。

当  $n = 1$  时, 式(2-7)和式(2-8)退化为早期橡胶硫化研究相关论文中所涉及的简单模型, 也是常用的完全硫化橡胶热物性参数表述模型; 当  $n = 2$  时, 式(2-7)和式(2-8)为目前常用的没有考虑部分硫化橡胶影响的导热系数和比热容计算表达式, 即 2.2.1 节所采用的现有热物性参数模型; 当  $n \geq 3$  时, 式(2-7)和式(2-8)就是考虑未硫化橡胶、中间硫化状态的橡胶和完全硫化橡胶的导热系数和比热容的多维模型; 图 2-7 为  $n = 3$  时多维热物性参数模型中比热容和导热系数试验结果的拟合情况, 由于该模型是对 3 种硫化状态的试验结果进行直接线性或分段线性拟合, 故由现有热物性参数模型所导致的硫化程度为 0.5 的橡胶热物性参数预测误差得到控制, 由此可见, 多维模型能更精确反应硫化过程中橡胶热性能的变化。

一般认为  $n$  取值越大, 多维模型就越能准确描述橡胶在各个中间硫化状态热物性参数的变化规律, 预测精度就越高; 而实际上, 当  $n > 3$  时, 不同硫化

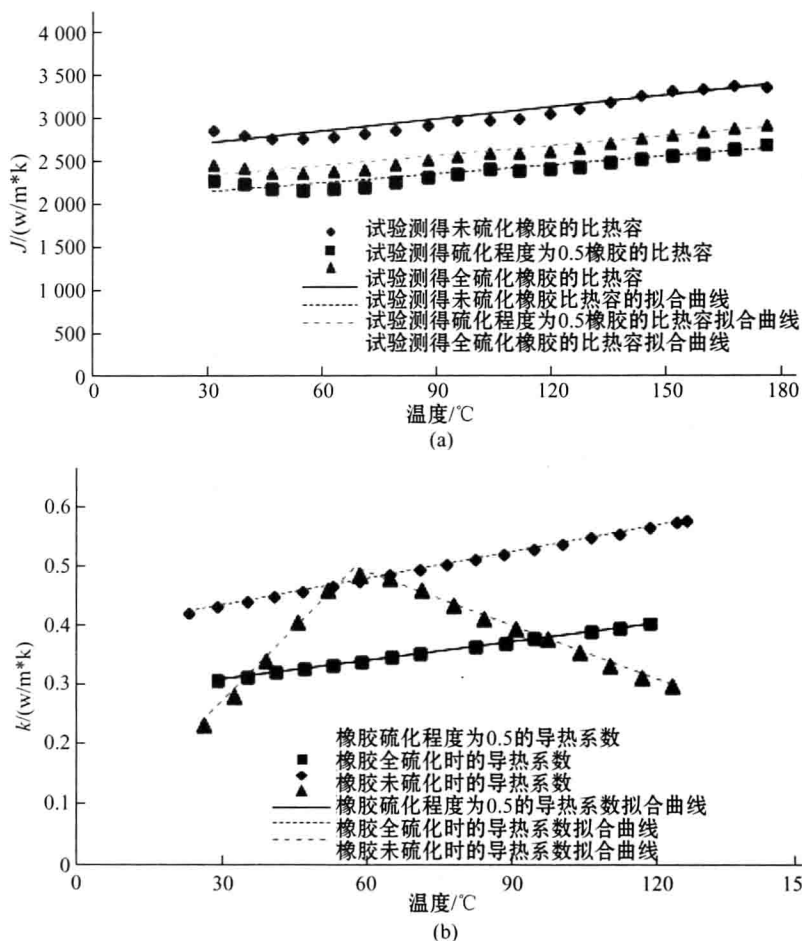


图 2-7 多维模型与试验结果的对比

(a) 比热容 (b) 导热系数

状态热物性参数之间为大于3次的多项式函数关系,其分析结果发散性很大,可能导致硫化仿真不收敛、预测精度反而降低,而当 $n=3$ 时各种硫化状态热物性参数之间为二次函数关系,预测结果相对稳定;因此,本章所采用多维模型中, $n=3$ ,即设为二次多项式函数。

综上所述,橡胶多维热物性参数模型的建立流程包括:①研究胶料的等温硫化动力学特性,确定不同硫化状态橡胶制备的工艺条件;②把生胶放入硫化模具中,进行加热硫化,制备不同硫化状态的橡胶试样;③进行不同硫化



状态试样热物性参数测试,确定密度、比热容试验和导热系数;④根据比热容和导热系数测试结果拟合多维热参数模型,具体流程如图 2-8 所示。

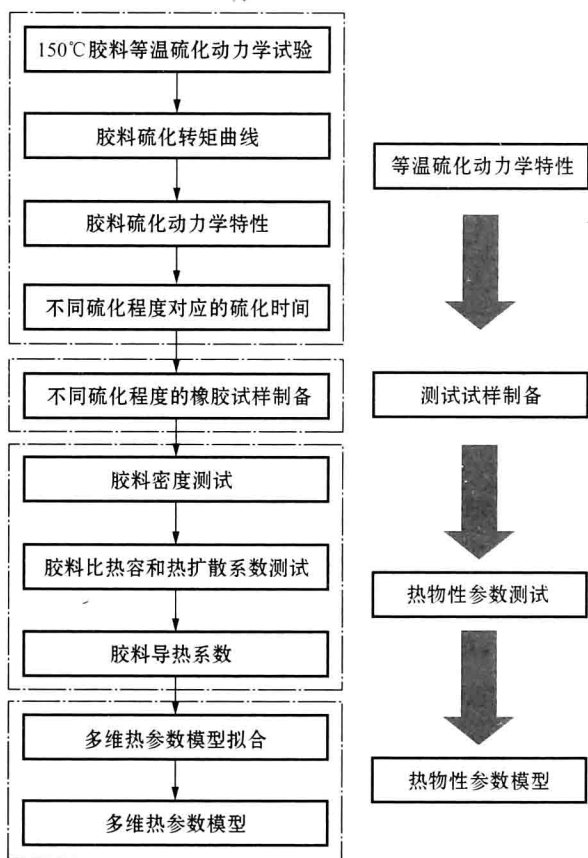


图 2-8 橡胶多维热物性参数模型建立流程

## 2.3 橡胶-帘线复合材料热物性参数建模

子午线轮胎中的橡胶-帘线层主要有:胎体层、加强层和带束层。橡胶-帘线层的制备主要包括在帘线上涂胶和根据使用角度进行裁剪两步,如图 2-9 所示。在这些部件中,帘线的几何角度、间距、截面积等都不尽相同,传热效率、方向等均存在很多差别,给热物性参数的表述带来巨大困难,而橡胶-帘线



复合材料热物性参数是轮胎硫化工艺特性分析的重要因素,对其变化规律进行理论研究非常有必要。

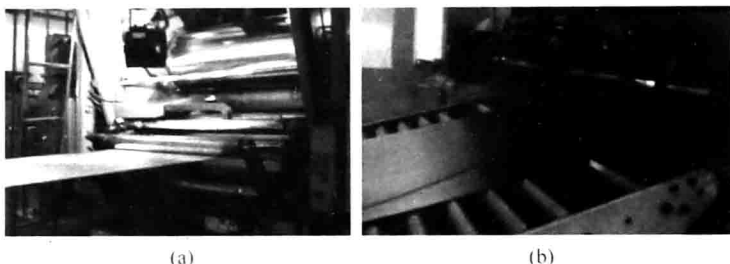


图 2-9 橡胶-帘线层制备过程

(a) 在帘线上涂胶 (b) 根据使用角度进行裁剪

### 2.3.1 橡胶帘线混合定律模型的提出

目前,在轮胎硫化研究中,橡胶帘线的热物性参数的处理方式主要有两种:①假设橡胶帘线层为单一橡胶或者帘线材料,该方法与实际情况差别较大,一般应用在轮胎硫化性能参数的初步估算过程中;②假设橡胶帘线层为各向同性复合材料,根据硫化测温试验结果或工程经验调整其热物性参数为定值,但该方法不能实现通用化,仅适用于某一特定规格的轮胎。

由于本书的研究目标是轮胎的整体硫化性能,而不是单纯的轮胎中某一局部,而且从宏观上看,轮胎硫化为轴对称问题,可以不考虑局部方向效应。因此,尝试采用混合定律模型来模拟橡胶-帘线复合材料的热物性参数变化规律。对于带束层、胎体层和加强层等橡胶-帘线复合材料结构,借鉴复合材料混合定律法则,综合考虑橡胶热物性参数、帘线热物性参数和帘线体积分数等因素,假设橡胶-帘线为各向同性复合材料,采用式(2-9)来描述橡胶-帘线复合材料的比热容、导热系数和密度:

$$\begin{cases} k_{\text{com}}(T) = v_s k_s + (1 - v_s) k_p(T) \\ \rho_{\text{com}} = v_s \rho_s + (1 - v_s) \rho_p \\ c_{\text{com}}(T) = \frac{v_s \rho_s c_s + (1 - v_s) \rho_p c_p(T)}{\rho_{\text{com}}} \end{cases} \quad (2-9)$$



式中,  $k_{\text{com}}(T)$ 、 $\rho_{\text{com}}$  和  $c_{\text{com}}(T)$  分别为复合材料的导热系数、密度和比热容;  $v_s$ 、 $\rho_s$ 、 $k_s$  和  $c_s$  分别为帘线的体积分数、密度、导热系数和比热容;  $k_p(T)$ 、 $\rho_p$  和  $c_p(T)$  分别为橡胶的导热系数、密度和比热容。

### 2.3.2 混合定律模型验证

为了验证上述混合定律的正确性,利用有限元法对比分析单独定义橡胶和帘线热物性参数的橡胶帘线赋值模型以及通过混合定律定义复合材料参数的混合定律赋值模型在受热的情况下的温度变化规律。分析时采用的橡胶帘线结构如图 2-10 所示,其中 1 和 4 均为两侧橡胶层,2 是中间橡胶层,3 是钢丝;2 和 3 统称为复合材料层,该层结构参数根据轮胎中胎体层建立。其中帘线采用的是胎体帘线,其截面积是  $1.43\text{e}-6\text{m}^2$ ,帘线之间的间距为  $2.08\text{e}-3\text{m}$ ;橡胶帘线层的宽度是  $1.8\text{e}-3\text{m}$ ,帘线的体积分数  $v_s$  为 37.7%。橡胶热物性参数、帘线热物性参数以及利用混合定律模型[见式(2-3)]计算得到的复合材料热物性参数如表 2-2 所示。

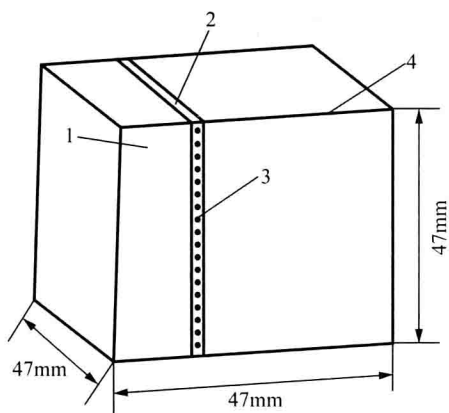


图 2-10 橡胶帘线结构

表 2-2 热物性参数表

热物性参数	橡胶	帘线	混合定律
导热系数 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	0.5	20	12.6485
密度 $\text{kg}/\text{m}^3$	1190	7000	4809.63
比热容 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	2300	600	758.5716

#### 1) 有限元模型的建立

采用 HyperMesh 软件对图 2-10 所示的橡胶帘线结构进行网格划分,如图 2-11 所示,网格节点总数为 16 544,单元总数为 13 215,单元类型为





DC3D8 和 DC3D6。由于中间橡胶帘线层的网格密度大,两边的1#和2#橡胶层网格密度小尺寸大,两者节点不共享,因此在它们之间的材料分界面上定义绑定约束。分别赋予各部分单元材料属性,对于中间复合层采用橡胶、帘线热物性参数和混合定律热物性参数的两种方式定义,即橡胶帘线赋值模型和混合定律赋值模型,利用 ABAQUS 有限元分析软件对模型初始和边界条件进行设置,初始温度取  $20^{\circ}\text{C}$ ,在橡胶层1 远离橡胶帘线层的一侧施加的温度取  $170^{\circ}\text{C}$ (相当于水囊一侧),在橡胶层2 远离中间复合层的一侧施加的温度取  $151^{\circ}\text{C}$ (相当于钢模一侧),计算时间设定为  $3000\text{ s}$ (相当于轮胎机内硫化时间)。运用 ABAQUS/Standard 求解器模块来分别对两种热物性参数赋值模型进行温度场计算。图 2-11 中与1#面平行截面上的分析结果相当于  $0^{\circ}$ 帘线角的情况,与2#面平行截面上的分析结果相当于  $90^{\circ}$ 帘线角的情况。

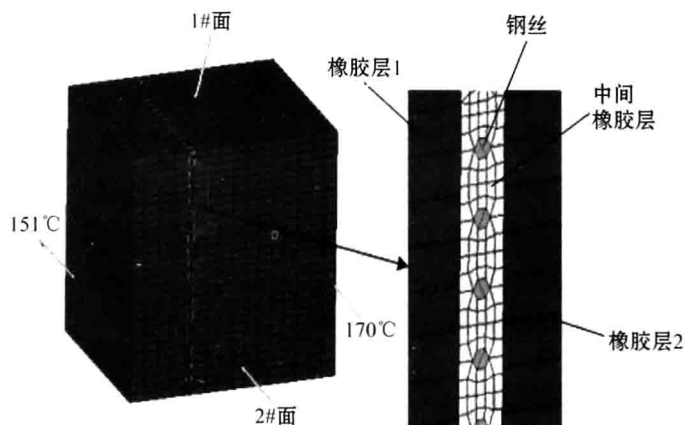


图 2-11 橡胶帘线结构的网格划分几何模型

## 2) 结果分析与讨论

为了验证在不同帘线角度下混合定律模型的合理性,需要对不同帘线角度下进行温度场对比研究,本节选取  $0^{\circ}$ 帘线角和  $90^{\circ}$ 帘线角作为一般性帘线角度的代表。

(1)  $0^{\circ}$ 帘线角。 $0^{\circ}$ 帘线角度下的温度场分布对比如图 2-12 所示,由图可知,两者在沿热传导方向上的温度场分布基本相同,最大最小温度点数值和



位置完全一样;图 2-13 为任意选取的橡胶帘线赋值模型和混合定律赋值模型中内部一截面的温度场对比云图,两者的温度场分布也基本相同,两个截面上的温度处处相等,说明帘线角度对其影响可以忽略。

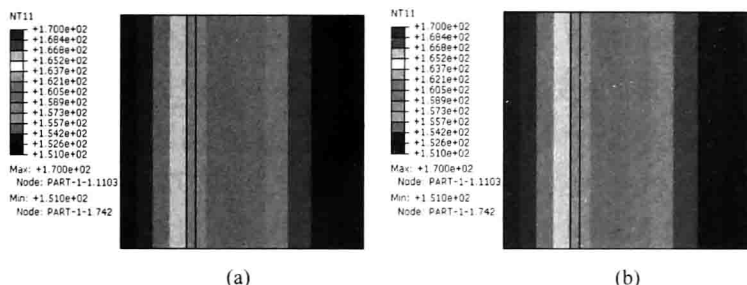


图 2-12 橡胶帘线赋值模型与混合定律赋值模型温度场对比云图( $^{\circ}\text{C}$ )  
(a) 橡胶帘线 (b) 混合定律

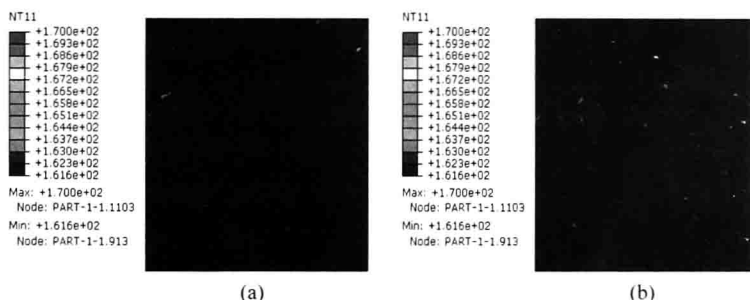


图 2-13 橡胶帘线赋值模型与混合定律赋值模型温度场对比云图( $^{\circ}\text{C}$ )  
(a) 橡胶帘线 (b) 混合定律

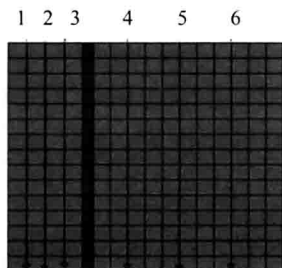


图 2-14  $0^{\circ}$ 时的 6 条分析路径

为了更为全面比较两个模型之间的温度场变化,选取了如图 2-14 所示的 6 条路径进行对比分析。图 2-15 为  $0^{\circ}$ 帘线角时,1#、2#路径绘制的温度变化趋势图,两种赋值模型的分析结果几乎相同,最大差值小于  $0.4^{\circ}\text{C}$ ; 6 条路径各自的均值和标准差如表 2-3 所示,从计算的结果来看,橡胶帘线赋值模型计算结果高于混合定律



赋值模型,但两者在6条不同路径的温度均值差都在 $0.5^{\circ}\text{C}$ 范围内,其各自的标准差在精度为0.001的情况下均为0。

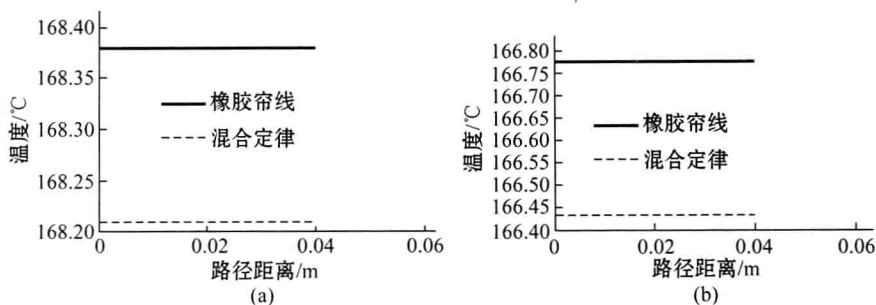


图 2-15  $0^{\circ}$ 时沿 2 条路径的温度变化曲线

(a) 路径 1 (b) 路径 2

表 2-3  $0^{\circ}$ 时两者沿 6 条路径的温度变化的均值和标准差

统计数据		路径 1	路径 2	路径 3	路径 4	路径 5	路径 6
橡胶帘线	均值/ $^{\circ}\text{C}$	168.38	166.774	165.197	160.346	156.829	153.775
	标准差/ $^{\circ}\text{C}$	0	0	0	0	0	0
混合定律	均值/ $^{\circ}\text{C}$	168.209	166.437	164.703	160.275	156.708	153.691
	标准差/ $^{\circ}\text{C}$	0	0	0	0	0	0
均值差百分比/%		0.12	0.18	0.30	0.04	0.07	0.05

以上都是比较在同一时间点(3000 s)上两种赋值模型的温度变化情况。为了比较它们在时间变化的情况下温度变化情况,选取内部特征节点 5331、5105 来分析橡胶帘线赋值模型和混合定律赋值模型随时间推移的温度变化曲线,结果如图 2-16 所示,两种模型所求出的温度变化曲线几乎重合。再结合上面的不同路径的分析结果,可以得出在 $0^{\circ}$ 帘线角时,橡胶帘线赋值模型和混合定律赋值模型得到的温度场分布规律高度一致。可见,在 $0^{\circ}$ 帘线角情况下所提出的混合定律模型是正确的。

(2)  $90^{\circ}$ 帘线角。在 $90^{\circ}$ 帘线角情况下,两者的温度场分布云图对比结果与 $0^{\circ}$ 帘线角一致,不再重复阐述,仅从路径分析和内部特征节点随时间变化分析的角度进行对比分析。选取了如图 2-17 所示的 6 条路径进行对比分

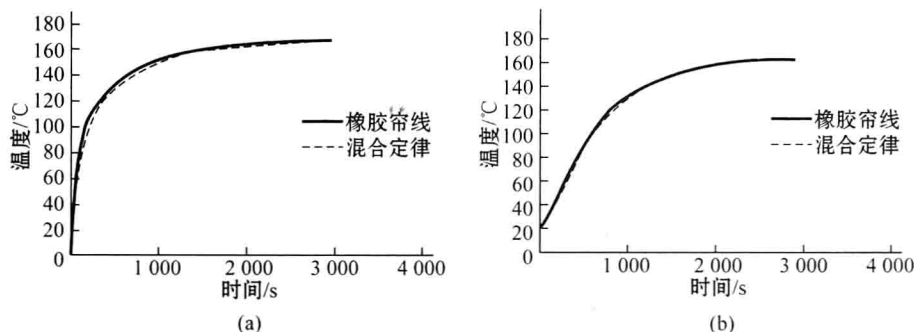


图 2-16 0°时节点温度变化曲线

(a) 节点 5331 (b) 节点 5101

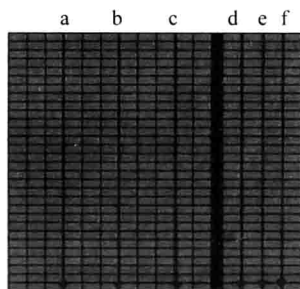


图 2-17 90°时的 6 条分析路径

析,图 2-18 为 90°帘线角时,从路径 a、路径 b 绘制的温度变化趋势图,两者结果几乎相同,橡胶帘线赋值模型稍高于混合定律赋值模型,最大差值小于 0.2°C; 6 条路径中各自的均值和标准差如表 2-4 所示,从计算的结果来看,橡胶帘线赋值模型计算结果也高于混合定律赋值模型,但两者在 6 条不同路径的温度均值差都在 0.5°C 范围内,其各自的标准差在精度为 0.001 的情况下也都为 0。

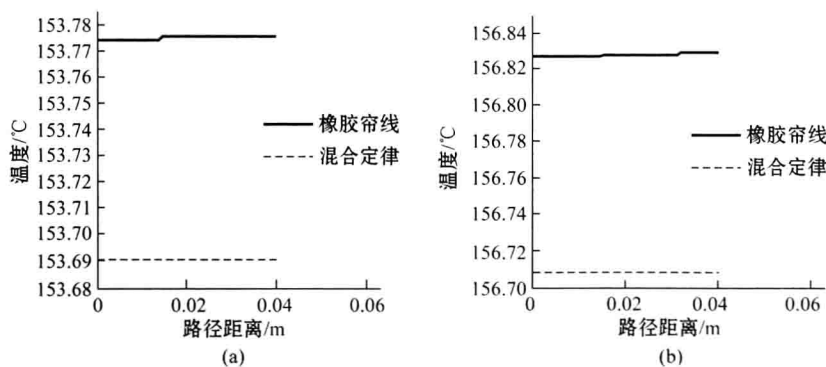


图 2-18 90°时沿 2 条路径的温度变化曲线

(a) 路径 a (b) 路径 b



表 2-4 90°时两者沿 6 条路径的温度变化的均值和标准差

统计数据		路径 a	路径 b	路径 c	路径 d	路径 e	路径 f
橡胶帘线	平均值/°C	153.775	156.829	160.346	165.197	166.774	168.38
	标准差/°C	0	0	0	0	0	0
混合定律	平均值/°C	153.691	156.708	160.275	164.703	166.437	168.21
	标准差/°C	0	0	0	0	0	0
均值差百分比/%		0.05	0.07	0.04	0.30	0.18	0.12

图 2-19 为橡胶帘线赋值模型和混合定律赋值模型中内部特征节点 1172、821 随时间推移的温度变化曲线拟合图。可见,两种模型所求出的温度变化曲线也几乎重合,再结合上面的不同路径的分析结果,可以得出 90°帘线角时,橡胶帘线赋值模型和混合定律赋值模型得到的温度场也高度一致,从而说明在这种情况下混合定律模型也具有合理性。可见,两种代表性的帘线角下,混合定律模型都具备合理性,换言之,混合定律模型当面对不同帘线角时依然成立。

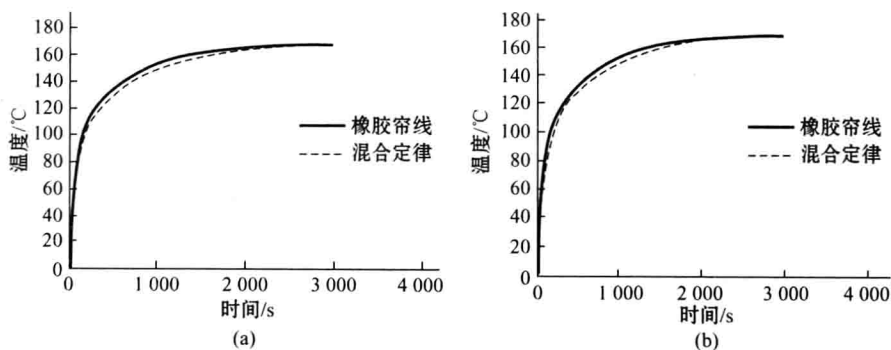


图 2-19 90°时节点的温度变化曲线

(a) 节点 1172 (b) 节点 821

## 2.4 小结

基于橡胶未硫化、部分硫化及完全硫化 3 种状态的试验数据,建立了橡胶



导热系数和比热容随着温度和硫化程度变化的多维模型。此外,本章还借鉴复合材料混合定律法则,建立了一种适用于轮胎硫化理论研究的橡胶-帘线热物性参数混合定律模型,通过橡胶帘线赋值模型和混合定律赋值模型有限元软件分析对其进行验证。所得结论如下:

(1) 不同硫化状态橡胶的比热容和导热系数与温度均呈线性或分段线性变化关系,部分硫化状态橡胶的热物性参数与完全硫化橡胶和未硫化橡胶的热物性参数之间没有严格的线性关系。

(2) 对比试验数据和现有热物性模型中的比热容以及导热系数分析数据,可知现有热物性模型中部分硫化胶热物性参数与试验结果存在一定差异,因此,现有热物性参数模型不能够有效模拟硫化过程中橡胶的热物性参数变化规律。

(3) 基于未硫化橡胶、部分硫化橡胶及完全硫化橡胶的比热容和导热系数的试验数据,提出了橡胶导热系数和比热容在硫化过程中随着温度和硫化程度变化的函数,即多维模型,且与试验结果吻合良好,克服了现有热物性模型的缺陷。

(4) 提出采用混合定律模型来描述橡胶帘线热物性参数变化规律,对橡胶帘线赋值模型和混合定律赋值模型进行有限元分析,结果表明,在不同帘线角度下,两种模型算出的温度场分布规律基本一致,证明了混合定律模型的正确性。



# 橡胶硫化动力学与硫化反应热

橡胶硫化过程中,硫化反应动力学特性具有明显的不均匀性、时变性和温度相关性,一般可采用硫化动力学模型来定量描述热硫化阶段橡胶硫化程度随时间、温度的变化规律。然而,由于橡胶配方的种类繁多,现有硫化动力学模型无法描述多种胶料在硫化全过程中橡胶硫化程度随时间、温度的变化规律。为此,本书通过硫化动力学试验结果,提出一种能够精确描述橡胶在硫化全过程中硫化程度随时间、温度变化的混合动力学模型。

### 3.1 橡胶硫化反应分析

#### 3.1.1 橡胶硫化反应发展简述

作为工业产品,橡胶已经被使用了几个世纪。室温下橡胶是黏性液体状物质,在其自然状态下不能用于制造橡胶产品。1839年,Charles Goodyear发现天然橡胶中混合液态硫黄不仅不会使橡胶分子链退化,而且会使橡胶在较宽的温度范围内表现出更加稳定的物理性能。此后,Thomas Hancock把硫黄作为添加剂来改变天然橡胶属性,发现硫黄是一种改变天然橡胶分子链的交联剂,加工温度每提高 $10^{\circ}\text{C}$ ,橡胶硫化速度提高2倍。

在20世纪20年代,2-mercaptobenzothiazole(MBT)和2-benzothiazole disulfide(MBTS)等化学添加剂被应用到橡胶硫化工艺上,这些化合物起到了缓凝剂的作用,即延缓交联反应速度来保证材料有足够成型和加工时间。在



20 世纪 30 年代,人们开发出了间硫氮茂加速剂,大大提高了硫化反应速率,从而降低了硫化时间。1968 年,由于 N-cyclohexylthiophthalimide(PIV)的问世,焦烧时间、硫化速率和最终硫化程度等硫化参数第一次实现了独立控制。目前,橡胶生产工艺已趋于成熟,可以根据需求制造出具有特定物理性能的橡胶产品。

### 3.1.2 橡胶硫化反应过程

橡胶硫化反应历程如图 3-1 所示,其硫化过程可划分为以下 3 个阶段:

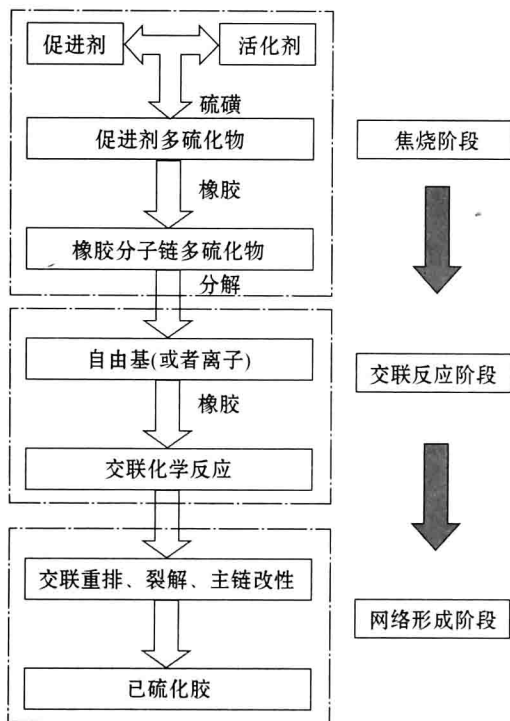


图 3-1 橡胶硫化反应历程

#### 1) 焦烧阶段

在此期间,硫黄、促进剂、活化剂发生相互作用,增加了活化剂在生胶中的溶解度,进而活化了促进剂,硫黄和促进剂之间发生化学反应生成了活性





较强的多硫化物;多硫化物与橡胶发生化学反应,产生橡胶大分子自由基。

### 2) 交联反应阶段

在此期间,橡胶大分子自由基或离子继续与橡胶分子链发生化学反应,生成交联键。

### 3) 网络形成阶段

在此期间,交联键发生交联重排、裂解和主链改性,组后生成网络相对稳定的完全硫化胶。

## 3.2 橡胶硫化动力学试验研究

本书对 TVPA、TMD、ALT、THC、BASE、ANN 和 BACI 等 7 种胶料进行了硫化动力学试验,测出这些胶料的硫化转矩随时间的变化关系,并通过计算拟合出相对应的焦烧时间-温度关系曲线、不同温度下的硫化程度-时间曲线及不同温度下的硫化反应速率-硫化程度曲线,为焦烧建模和硫化动力学建模提供了试验数据。

### 3.2.1 硫化动力学试验

根据国家标准《橡胶硫化仪使用指南(GB/T 25268/2ISO6502:1992)》,采用橡胶加工分析仪 RPA2000 测量橡胶硫化动力学特性,该设备采用密闭式双锥形模腔,试样体积约  $4.5\text{ cm}^3$ ,可控升温冷却速度为  $1^\circ\text{C}/\text{s}$ ,振荡幅度为  $\pm 0.05\sim\pm 90^\circ$ ,振荡频率为  $0.03\sim 33\text{ Hz}$ ,标准扭矩范围为  $0.01\sim 225\text{ dN}\cdot\text{m}$ ,如图 3-2 所示,具体试验过程如下:

(1) 为了减少操作焦烧时间对测试结果的影响,直接从轮胎部件挤出机所挤出的胶片中截取 3 片胶料,用于测量  $135^\circ\text{C}$ 、 $145^\circ\text{C}$  和  $160^\circ\text{C}$  3 种恒温下的硫化转矩-时间历程。

(2) 试验时,在模腔中放入胶料,加热到所需的硫化温度。基本原则为:  
①在进行等温硫化实验时,准备温度应与硫化或定时实验的温度设置一致。  
②硫化实验中应变角度应小于  $0.5^\circ$ ,以防止打滑。  
③通常在预热过程中可使用定时测试替代延时测试,因为定时测试在实验过程中可进行数据采集,预

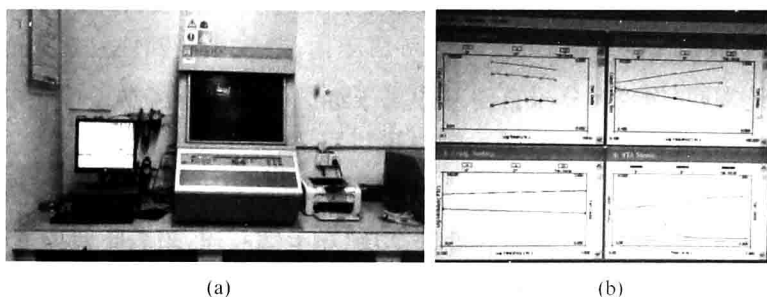


图 3-2 橡胶硫化动力学试验设备

(a) RPA2000 橡胶加工分析仪 (b) RPA2000 软件界面

热实验可使试样趋于稳定以获得一致的实验结果。通常在应变扫描、频率扫描、温度扫描、组合扫描前都需要对试样预热。④如果上一个测试的温度与硫化测试的温度不一致,则硫化测试中,进行的是非等温硫化。

(3) 通过上模在预设的幅度和频率下的摆动测出硫化转矩。因橡胶混合物表现为黏弹性流体行为,可应用线性黏弹性理论获得剪切模量的存储和损失量;且随着橡胶交联反应的不断完成,达到同一变形量的转矩会增加,从而导致剪切模量增加,即交联密度(硫化程度)越大,剪切模量越大。因此,可以认为存储剪切模量就是橡胶的剪切模量。

### 3.2.2 试验结果分析

通过硫化动力学试验,可测得胶料在  $135^{\circ}\text{C}$ 、 $145^{\circ}\text{C}$  和  $160^{\circ}\text{C}$  3 种温度下硫化转矩随时间的变化关系。确定胶料在模型中加热时保持流动性的时刻,可得到在这 3 种温度下的焦烧时间分别为 32.7 s、25.3 s 和 17.6 s。根据硫化转矩-时间曲线,由式(1-19)得出硫化程度-时间曲线,通过将硫化程度对时间求导得出硫化程度-硫化反应速度曲线,分别如图 3-3 和图 3-4 所示。由图中所示结果可知:①在试验结束时,橡胶硫化反应也基本结束,温度越高,硫化反应速率就越高,硫化反应就越快结果;②硫化反应速率的峰值一般发生于硫化程度为 0.3~0.4 时,此处与橡胶硫化程度-时间曲线的拐点相对应。

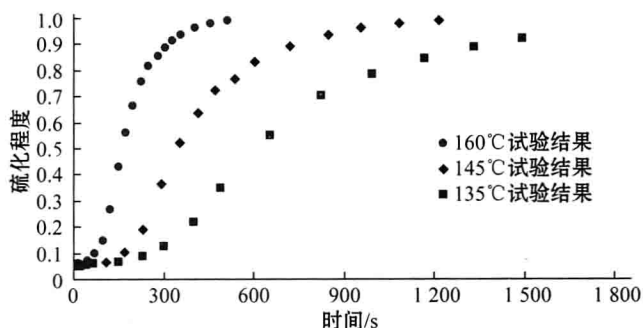


图 3-3 硫化程度-时间历程

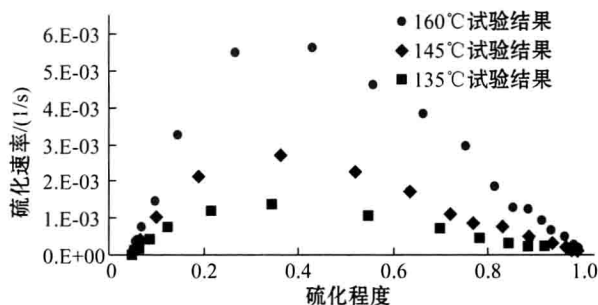


图 3-4 硫化程度-硫化反应速率历程

### 3.3 橡胶硫化动力学建模

#### 3.3.1 焦烧模型选取

采用 Isayev 和 Deng 提出无量纲参数  $i$  结合 Arrhenius 函数来描述橡胶硫化的焦烧现象[见公式(3-1)],可得  $t_0=0.00114$ ,  $T_0=4186.86$ 。

$$i = \int_0^t \frac{dt}{t_i(T)}, \quad t_i(T) = t_0 e^{\frac{T_0}{T}} \quad (3-1)$$

式中,  $t$  为时间,  $t_0$  和  $T_0$  为独立于温度的材料常数, 当  $i < 1$  时, 橡胶处于焦烧期; 当  $i > 1$  时, 开始硫化反应。



### 3.3.2 传统动力学模型分析

基于 Origin 软件,分别利用 K-R 硫化动力学模型(见式 1-17)及修正 K-S 硫化动力学模型(见式 1-18)对试验结果进行拟合,结果分别如图 3-5 和图 3-6 所示,两个模型的拟合结果与试验结果基本吻合,K-R 动力学模型在 135℃等温硫化时拟合精度最高,但随着温度升高,拟合精度降低,修正 K-S 动力学模型在 3 种温度下对试验数据的拟合效果较好,但在硫化前期误差很大。为了更为直观地对比分析动力学模型的精确性,根据图 3-5 所得到的模型参数,采用数值标定法将硫化程度-硫化速率曲线转化为硫化程度-时间曲线,即通过式(3-2)编写 Matlab 程序进行欧拉迭代计算,结果如图 3-7 所示。由图 3-7 可知,K-R 动力学模型拟合精度在等温硫化初期比较高,而修正 K-S 动力学模型在等温硫化后期比较高,而在硫化中期两个模型均存在较大的误差。

$$\alpha_j = \alpha_{j-1} + \left( \frac{d\alpha}{dt} \right)_{j-1} \times \Delta t \quad (3-2)$$

式中,  $\alpha_j$ 、 $\alpha_{j-1}$  分别为当前硫化程度、上一步硫化程度,  $\Delta t$  为时间增量,  $\frac{d\alpha}{dt}$  为硫化速率。

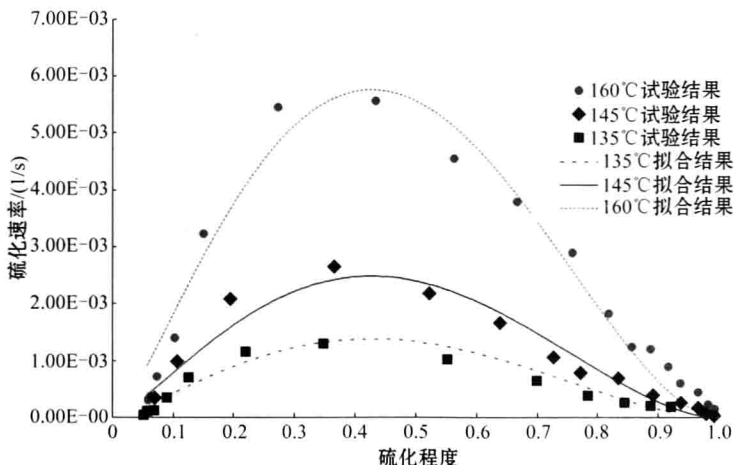


图 3-5 K-R 模型与试验结果对比

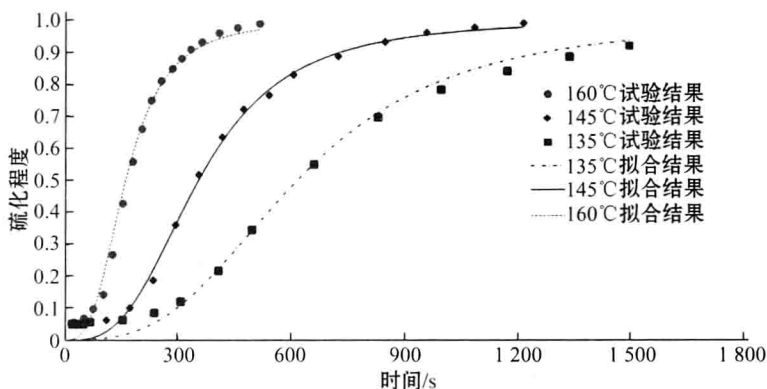


图 3-6 修改 K-S 模型与试验结果对比

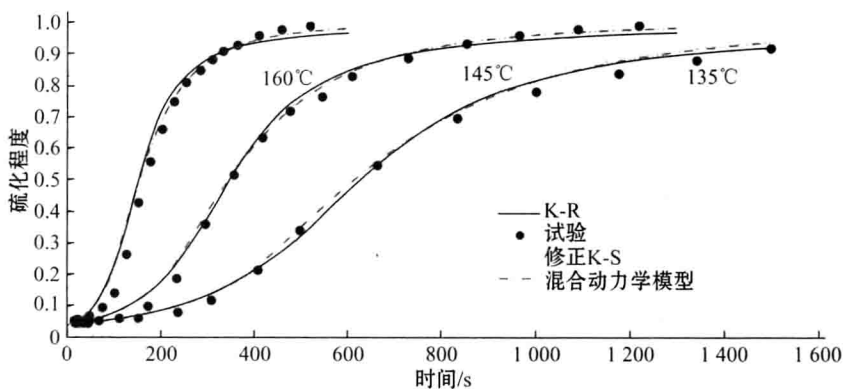


图 3-7 3 种模型拟合结果比较

### 3.3.3 混合动力学模型建立

为了克服现有硫化动力学模型的不足,本章提出了一种基于 K-R 动力学模型和修正 K-S 动力学模型的混合动力学模型,如式(3-3)所示,当  $\alpha \leq \alpha_0$  时,使用 K-R 动力学模型,即在橡胶硫化初期采用 K-R 动力学模型描述硫化程度的变化历程;当  $\alpha > \alpha_0$  时,则使用修正 K-S 动力学模型,即橡胶硫



化后期采用修正 K-S 动力学模型描述硫化程度的变化历程。由于修正 K-S 动力学模型是定量描述硫化程度随温度和时间变化关系的数学表达式,为了与 K-R 动力学模型在数学形式上保持一致,通过硫化程度对时间求导,可得硫化反应速率随着硫化程度和温度的数学方程,即式(3-3)的下半部分公式。

$$\frac{d\alpha}{dt} = \begin{cases} (K_1 + K_2 \alpha^m)(1-\alpha)^n, & K_1 = A_1 e^{-\frac{E_1}{RT}}, K_2 = A_2 e^{-\frac{E_2}{RT}}, \text{当 } \alpha \leq \alpha_0 \text{ 时} \\ \frac{l}{k}(1-\alpha)^2 \left( \frac{\alpha}{1-\alpha} \right)^{\frac{l}{l-1}}, & K = A e^{-\frac{E}{RT}}, \text{当 } \alpha > \alpha_0 \text{ 时} \end{cases} \quad (3-3)$$

式中,  $\frac{d\alpha}{dt}$  为硫化反应速率,  $\alpha$  为硫化程度,  $E$ 、 $E_1$  和  $E_2$  为活化能,  $R$  为气体常数,  $m$ 、 $n$ 、 $l$  为反应的阶数,  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A$  为频率指数,  $\alpha_0$  由数值标定确定,一般在 0.3 左右。当  $\alpha_0$  为 1 时, 式(3-3)为 K-R 硫化动力学模型, 当  $\alpha_0$  为 0 时, 式(3-3)则为修正 K-S 硫化动力学模型。

同样采用数值标定法进行欧拉迭代计算, 由式(3-3)对试验数据进行拟合, 结果如图 3-7 所示。混合动力学模型的分析结果在硫化前期与 K-R 动力学模型一致, 在硫化后期与修正 K-S 动力学模型一致, 在硫化中期的预测精度高于这两种模型, 与试验结果吻合最好。由此可知, 式(3-3)可以精确描述胶料在硫化全过程中橡胶硫化程度随时间、温度的变化规律。

综上所述, 在研究轮胎中胶料硫化动力学性能时, 可采用图 3-8 所示的流程图进行橡胶硫化动力学测试和模型表述: 首先在不同温度下对胶料进行恒温 RPA 测试, 得出相应温度下的硫化转矩曲线, 由硫化转矩曲线计算出焦烧时间和硫化程度变化规律, 根据焦烧时间确定最终焦烧模型, 同时根据硫化程度变化规律确定最终的硫化动力学模型, 建立轮胎中橡胶材料的硫化动力学和焦烧数据库, 为轮胎硫化-传热耦合建模提供动力学模型。

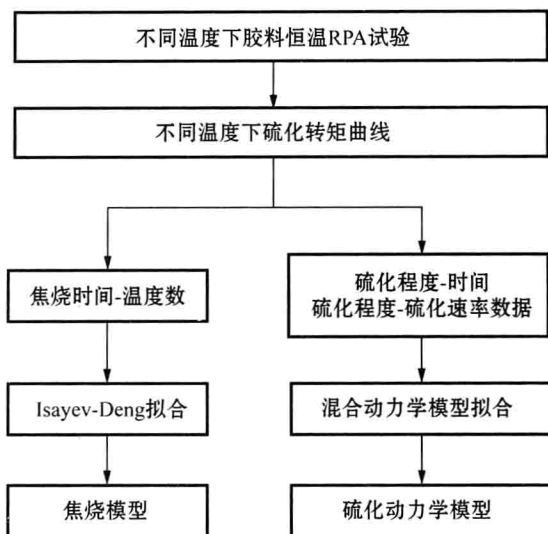


图 3-8 橡胶硫化动力学研究流程

## 3.4 橡胶硫化反应热模型及试验

### 3.4.1 硫化反应热模型选取

在橡胶硫化过程中,胶料内部的化学反应将释放出热量,即硫化反应热,加速硫化进程。硫化反应热可用式(3-4)表示:

$$\alpha = \frac{Q_t}{Q_\infty} \quad (3-4)$$

式中,  $Q_t$ 、 $Q_\infty$  分别为时间  $t$  时的反应热和反应总热量。因此,橡胶材料单位体积的生热率  $\bar{Q}$  则可表述为式(3-5):

$$\bar{Q} = Q_\infty \frac{\partial \alpha}{\partial t} \quad (3-5)$$

式中,  $Q_\infty$  为材料参数,可采用差示扫描量热(DSC)法测试。



### 3.4.2 硫化反应热试验

橡胶硫化反应热是采用 DSC 测试的,测试设备如图 3-9 所示。其主要技术参数:温度范围  $-150 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 、温度准确性  $\pm 0.2\text{ K}$ 、温度精度  $\pm 0.02\text{ K}$ 、升温速率  $0.02 \sim 300\text{ K/min}$ 、冷却时间(液氮冷却)  $15\text{ min}$  ( $100 \sim -100^{\circ}\text{C}$ )、量热灵敏度  $0.04\text{ }\mu\text{W}$ 、量热准确度  $1\%$ 、量热精度  $0.1\%$ 。



图 3-9 差示扫描量热仪(DSC)

具体测试过程如下:

#### 1) 装样

装样的原则是尽可能使样品均匀、密实地分布在样品皿内,以提高传热效率,减少试样与皿之间的热阻。因此要把较大样品剪成或切成薄片或小粒,并尽量铺平。一般使用的是铝皿,分成盖和皿两部分,样品放在其中间,用专用卷边压制器冲压而成。

#### 2) 橡胶硫化反应热的测量流程

轮胎胶料由液态氮控制降温,电子天平称量样本质量,给胶料施加的温度范围为  $25 \sim 250^{\circ}\text{C}$ ,升温速率为  $10^{\circ}\text{C/min}$ ,计算机控制试验工艺及采集数据。

胶料的 DSC 曲线如图 3-10 所示。从图中可以看出,曲线在  $196.42^{\circ}\text{C}$  (阴影区最高点)附近出现明显的放热峰,这是胶料硫化反应的放热峰,反应热由 DSC 软件自动算出。



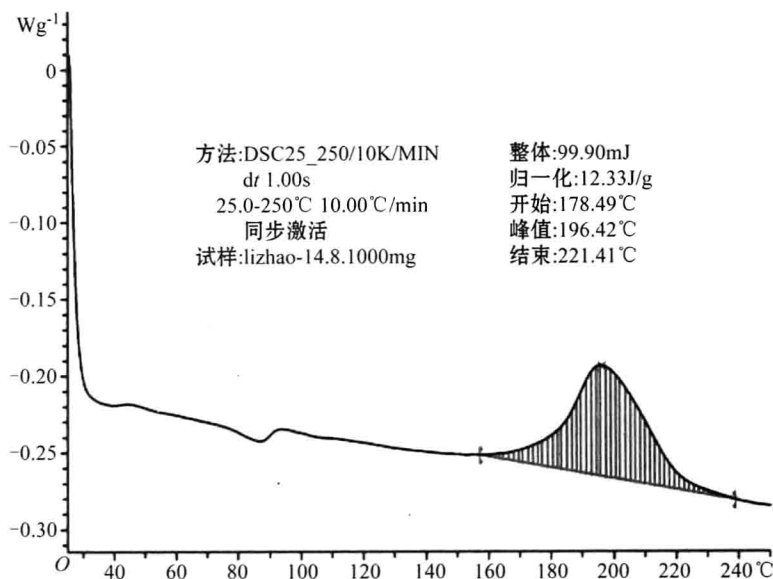


图 3-10 胶料的 DSC 曲线

### 3.5 小结

通过硫化动力学试验测得橡胶硫化转矩随时间的变化关系曲线,选取 Isayev 和 Deng 提出的无量纲参数模型描述焦烧过程,采用 K-R 动力学模型及修正 K-S 动力学模型描述橡胶硫化动力学特性,并运用数值标定和欧拉迭代法处理试验数据,从而建立了一种分段函数形式的混合动力学模型。所得结论如下:

(1) 通过硫化动力学试验测得胶料在 3 种温度下硫化转矩随时间的变化关系曲线,并通过数据处理可得胶料在这 3 种温度下的焦烧时间,采用 Isayev 和 Deng 提出的无量纲参数模型对试验结果进行拟合,可得到两个材料常数。

(2) 在试验结束时,橡胶硫化反应也基本结束,且温度越高,橡胶硫化反应越快,硫化反应速率越快,焦烧时间越短。硫化反应速率的峰值一般发生于硫化程度为 0.3~0.4 时,而且此处与橡胶硫化程度-时间曲线的拐点相



对应。

(3) K - R 动力学模型和修正 K - S 动力学模型均不能精确地描述橡胶的硫化动力学特性,为此采用分段函数形式建立了一种能涵盖现有硫化动力学模型且适用于数值计算的混合动力学模型,与试验结果吻合良好。

(4) 基于  $\bar{Q} = Q_{\infty} \frac{d\alpha}{dt}$  理论模型,采用差示扫描量热法(DSC)进行硫化反应热试验,即测试试样和参比物的功率差与温度的关系,可得胶料硫化反应的放热峰值和硫化反应热。



# 轮胎硫化-传热耦合建模及试验

轮胎硫化过程是橡胶交联反应和热量传递交替影响的多场耦合问题,已有的研究中硫化程度计算与传热计算大多按顺序耦合的方式进行,建模时多使用传统的热物性参数模型与硫化动力学模型,且较少关注轮胎在空气中的对流换热影响,这使得硫化数值模型与实际情况差别较大。为此,本书结合热物性参数和硫化动力学的研究成果,建立轮胎硫化过程的多场强耦合数学模型,使用两种方法对后硫化阶段的对流换热系数进行求解,并进行试验验证。

## 4.1 轮胎硫化数学模型构建

为了简化轮胎硫化过程数学模型,提高分析效率,在满足工程应用要求的前提下,对其提出若干合理性假设,主要包括:

(1) 在轮胎硫化的前几分钟,轮胎材料分布图已经基本形成,故可忽略硫化过程中材料流动对轮胎尺寸和结构的影响。

(2) 忽略胶囊与过热水之间、金属模具与高压蒸汽之间的对流换热,直接将胶囊的内表面温度和金属模具的外表面温度分别取值为过热水温度和高压蒸汽温度。

(3) 忽略橡胶帘线材料的各向异性,将胎体层、带束层和加强层均假设为各向同性的复合材料结构,即采用混合定律模型。

(4) 在机内硫化阶段(即升温阶段),硫化内压力非常高,故忽略胶囊与轮



胎之间、金属模具与轮胎之间的接触面热阻的影响。

(5) 在后硫化阶段(即降温阶段),忽略轮胎内腔热辐射效应,此时边界条件简化为轮胎与空气之间的对流换热过程。

(6) 所研究的子午线轮胎胎面胶上为纵向花纹,与其他部件一样,从宏观上看在周向子午面上的硫化传热特性基本相同,因此,可简化为轴对称问题。

基于以上假设,建立轮胎硫化过程数学模型,包括 3 个基本内容:控制方程(硫化-传热耦合方程)、初始条件和边界条件。建立轮胎硫化数学模型的流程如图 4-1 所示,分为机内硫化阶段和后硫化阶段两个子模型。

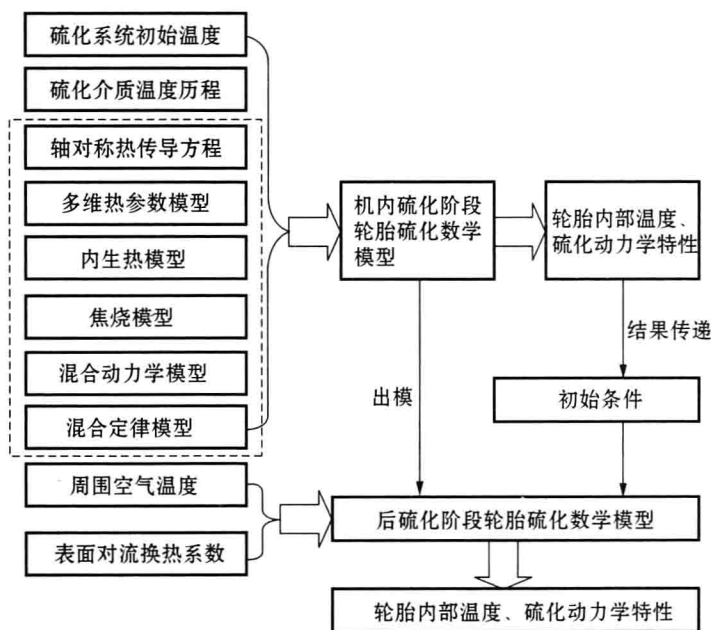


图 4-1 轮胎硫化数学建模方案

在控制方程方面,在轴对称传热模型基础上,需要结合前两章所确定的多维热参数模型、混合动力学模型、焦烧模型、内生热模型,建立硫化-传热耦合方程。其中,温度场与硫化场的强耦合作用主要体现在多维热参数模型中考虑了硫化程度因素,导致材料热物性参数与硫化动力学之间相互交替影响。

对于机内硫化阶段数学模型:硫化-传热耦合方程若结合初始温度条件和硫化介质温度历程这一边界条件,可建立机内硫化阶段的轮胎硫化数学模



型,计算出轮胎在硫化机中硫化时的温度、焦烧和硫化程度等特性参数。

对于后硫化阶段数学模型:在传递机内硫化阶段的温度、硫化程度、热流等参数结果作为初始条件的基础上,硫化-传热耦合方程结合轮胎与周围空气的对流换热边界条件,可建立降温阶段轮胎硫化数学模型,计算出轮胎在空气中利用余热硫化时的温度、焦烧和硫化程度等特性参数。

#### 4.1.1 子午线轮胎硫化系统简述

以某子午线轮胎作为研究对象,其硫化系统1包括金属模具2、轮胎3、金属模具4和水囊5,轮胎3位于金属模具2、4和水囊5之间(见图4-2)。轮胎3还包括耐磨层6、钢丝圈7、加强层8、垫胶9、过渡胶10、胎体层11、内衬层12、胎侧13、肩部垫胶14、胎冠15、带束层16、胎冠基部胶17。其中,加强层8、胎体层11和带束层16为橡胶-帘线复合材料结构,金属模具2、金属模具4、钢丝圈7为金属结构,其余均为橡胶结构。

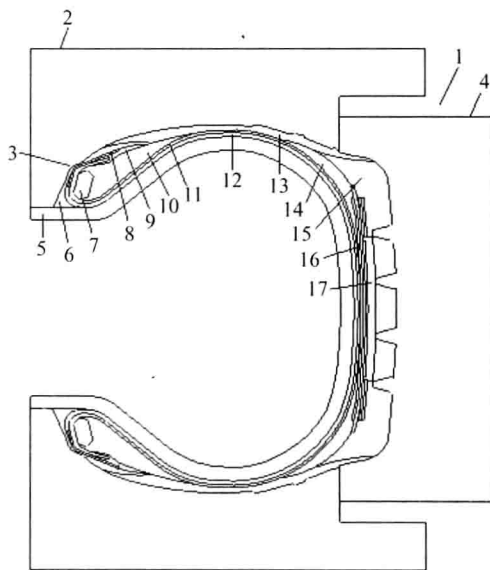


图4-2 轮胎硫化系统简图



### 4.1.2 硫化-传热耦合方程组构建

轮胎硫化-传热耦合方程组,包括轴对称热传导方程、多维热物性参数模型、混合定律模型、内生热模型、混合动力学模型和无量纲参数焦烧模型这 6 个控制方程。

基于硫化阶段胶料不发生流动的假设,取硫化系统中任一微元进行能量平衡分析,得到轴对称热传导方程(4-1)来描述硫化过程的热传导问题。

$$\rho c_P \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \rho \bar{Q} \quad (4-1)$$

式中,  $x$  和  $y$  为直角坐标系坐标,  $T$  为温度,  $t$  为时间,  $\rho$  为密度,  $c_P$  为比热容,  $k$  为导热系数,  $\bar{Q}$  为橡胶单位质量硫化反应生热率。

式(4-1)中橡胶单位质量硫化反应生热率  $\bar{Q}$  由内生热模型[见式(3-5)]确定;模型中涉及的  $\frac{\partial \alpha}{\partial t}$  为硫化反应速率,采用混合动力学模型[式(3-3)]来表述;热物性参数采用多维热参数模型[见式(2-1)和式(2-2)]和混合定律模型[见式(2-3)]来表述。另外,采用焦烧模型[见式(3-1)]判断硫化是否开始。

根据式(4-1),轮胎硫化-传热强耦合过程如下:当焦烧模型中无量纲参数小于 1 时,橡胶硫化程度为 0,混合动力学模型和硫化反应热模型不起作用,根据多维热物性参数模型,比热容和导热系数采用未硫化橡胶的热物性,用于温度场的计算;而当无量纲参数大于 1 时,橡胶开始发生硫化反应,混合动力学模型计算出硫化场,同时得出硫化程度和硫化反应速率,其中硫化程度用于比热容和导热系数计算,硫化反应速率用于硫化反应热的计算,进而得到温度场,在此过程中温度场和硫化场相互交替影响;当硫化程度等于 1 时,硫化反应结束,混合动力学模型和硫化反应热模型不起作用,根据多维热物性参数模型,比热容和导热系数采用完全硫化橡胶的热物性,用于温度场的计算。

### 4.1.3 硫化初始和边界条件设置

由于轮胎硫化过程分为机内硫化和后硫化两个阶段,根据硫化工艺条件



将两个阶段的具体历程定义如下:

### 1) 机内硫化阶段

(1) 初始条件。硫化仿真时初始条件为:

$$T_i = T_i(0) \text{ (在 } t = 0 \text{ 时刻, } 1 \leq i \leq 3) \quad (4-2)$$

式中,  $T_1(0)$  为轮胎初始温度, 其值取  $30^\circ\text{C}$ ;  $T_2(0)$  为硫化模具初始温度, 其值取  $120^\circ\text{C}$ ;  $T_3(0)$  为胶囊初始温度, 其值取  $100^\circ\text{C}$ 。

(2) 边界条件。机内硫化时间为 52 min, 前 5 min 胶囊中过热水温度由  $180^\circ\text{C}$  线性降至  $170^\circ\text{C}$ , 其后 47 min 温度保持不变; 硫化蒸汽温度前 6 min 保持  $120^\circ\text{C}$  恒定不变, 后 8 min 由  $120^\circ\text{C}$  线性升至  $151^\circ\text{C}$ , 最后 38 min 保持  $151^\circ\text{C}$  恒定不变。该阶段的边界条件为硫化胶囊与过热水和硫化钢模与高压蒸汽的传热, 这一类传热可以采用第一类边界条件来描述, 即:

$$T|_{\Gamma_1} = \bar{T}(t) \quad (4-3)$$

### 2) 后硫化阶段

(1) 初始条件。使用机内硫化阶段得到最终温度场和硫化动力学参数作为后硫化阶段的初始条件。

(2) 边界条件。环境温度取  $25^\circ\text{C}$ , 轮胎出模后与空气进行自然对流换热, 轮胎在余热的作用下继续进行硫化反应, 该阶段的边界条件为轮胎与空气的对流换热边界, 这一类传热可以采用第二类边界条件来描述, 即

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\Gamma_2} = h(T - T_\infty) \quad (4-4)$$

式中,  $T$  为给定边界温度,  $h$  为对流换热系数,  $T_\infty$  为周围环境温度。

## 4.2 对流换热系数求解研究

在轮胎后硫化阶段, 表面对流换热系数作为轮胎硫化数学模型的边界条件, 对硫化分析结果的准确性起着关键作用, 而对流换热系数的确定往往比较困难。确定对流换热系数最经典的方法有经验公式法、集总热容法和直接



导热法,这些方法与产品实际工作环境相差太大,具有很大局限性,很难获取真实的对流换热系数数据;近年来,CFD(计算流体动力学)方法和分区迭代法逐渐成为研究对流换热系数的主流方法。为此,本书分别采用 CFD 法和分区迭代法研究轮胎与空气之间的对流换热问题,并对这两种方法进行对比分析。

### 4.2.1 计算流体力学法

影响空气与轮胎之间对流换热系数的因素众多,比如换热面的形状、尺寸和位置,空气的流动特点等。为了能够准确地计算轮胎后硫化阶段的对流换热系数,本书提出了利用 CFD 分析确定轮胎与空气之间对流换热系数的方法,即将后硫化的轮胎与周围的空气域作为一个整体来进行热交换分析,如图 4-3 所示。选取合适的空气流动模型,运用 CFD 技术进行温度场求解,根据牛顿冷却定律确定表面对流换热系数。

轮胎与空气的对流换热 CFD 模型如图 4-3 所示。模型包括空气域的建立与网格划分、边界条件设定和空气流动模型的选取。

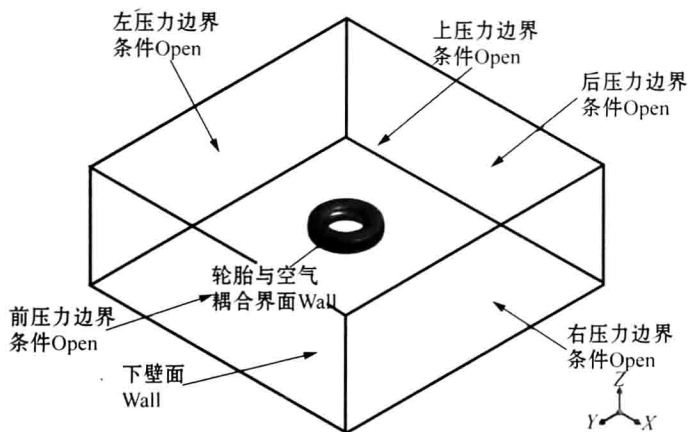


图 4-3 轮胎与空气的对流换热 CFD 模型

#### 1) 空气域的建立与网格划分

为了保证空气的流动不受其尺寸边界影响,经过对边界尺寸的多次试算,将空气域边界尺寸取为:  $X$  向,  $-5r \sim 5r$ ;  $Y$  向:  $-4d \sim 4d$ ;  $Z$  向:  $-5r \sim$





$5r$ , 其中  $d$  和  $r$  分别为轮胎断面宽和轮胎半径。

利用 HyperMesh 软件进行空气域的网格划分如图 4-4 所示, 网格类型为四面体非结构化三维网格, 考虑边界层效应, 在空气与轮胎的边界处划分边界层网格。

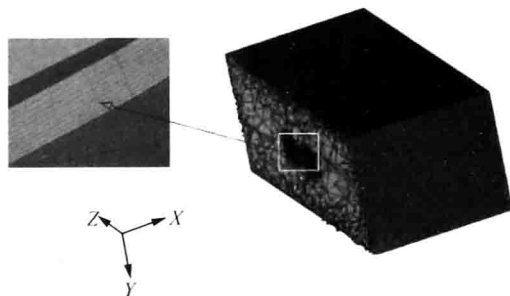


图 4-4 空气区域单元

## 2) 边界条件设定

(1) 空气域外部边界: 下壁面采用的是无滑移的恒温边界条件, 其他外部边界采用的是相对压力为 0MPa 的恒温边界条件, 温度设为环境温度 ( $25^{\circ}\text{C}$ )。

(2) 空气-轮胎接触边界: 分别取  $100\sim 150^{\circ}\text{C}$  中 6 个温度值 (以  $10^{\circ}\text{C}$  为间隔) 进行多次计算分析。

## 3) 空气流动模型选取

空气的不同流动状态对换热具有决定性影响。层流模型与湍流模型的选取是以  $Gr \cdot Pr$  值为依据。其中,  $Pr$  为普朗克数, 空气的普朗克数为 0.7;  $Gr$  为格拉晓夫数, 可以通过式 (4-5) 计算得到:

$$Gr = \frac{ga_v \Delta T l_c^3}{\nu^2} \quad (4-5)$$

式中,  $\nu$  为运动黏度,  $g$  为重力加速度,  $a_v$  为气体的体积膨胀系数,  $l_c$  为特征尺寸,  $\Delta T$  为对流传热温差。

对于轮胎表面而言, 当  $Gr \cdot Pr$  值处在  $10^4 \sim 1.5 \times 10^8$  范围内时, 空气流动模型选为层流模型; 当  $Gr \cdot Pr$  值大于  $1.5 \times 10^8$  时, 模型选为湍流模型。根据式 (4-5) 确定轮胎表面温度从  $100^{\circ}\text{C}$  到  $150^{\circ}\text{C}$  的  $Gr \cdot Pr$  值均在  $10^4 \sim 1.5 \times$



$10^8$  范围内, 因此分析应选取层流模型。

#### 4) 对流换热系数计算

利用计算流体力学软件 ANSYS CFX 进行 CFD 模型求解, 可以得到空气域的温度场以及轮胎表面的热流密度, 进而利用牛顿冷却公式(4-6)求出对流换热系数。

$$h = \frac{q}{(T_w - T_f)} \quad (4-6)$$

式中,  $T_w$  为轮胎内外表面温度,  $T_f$  为环境温度,  $q$  为轮胎内外表面的热流密度。

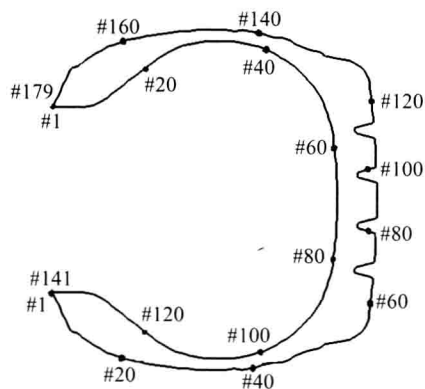


图 4-5 轮胎内外表面的节点号分布

为了便于描述轮胎内外表面不同位置对流换热系数, 对轮胎内外表面的节点进行重新编号, 其中外表面节点编号 #1~#179, 内表面节点编号 #1~#141, 具体见图 4-5(图中只给了部分节点编号)。

对不同轮胎表面温度进行仿真分析, 得到轮胎表面热流密度和轮胎周围的温度场, 由式(4-7)计算得到轮胎内外表面的对流换热系数, 如图 4-6 和图 4-7 所示。

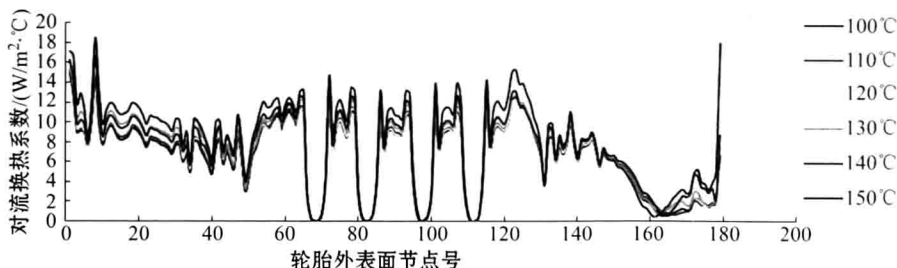


图 4-6 外表面对流换热系数随温度分布的变化规律

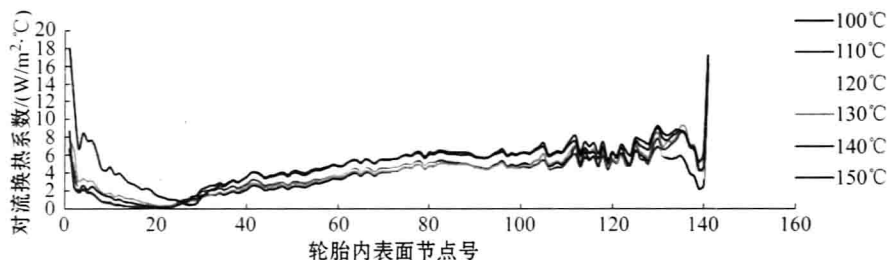


图 4-7 内表面对流换热系数随温度分布的变化规律

由图 4-6 和图 4-7 可知,对流换热系数随着温度的波动较小,说明轮胎表面温度对对流换热系数影响较小;由于空气浮升力作用,导致轮胎下半部分的对流换热系数大于上半部分;在图 4-6 中 60#—120# 节点之间区域为胎冠纵向花纹区,随着花纹向胎冠内部深入,此处形成局部半封闭区,空气流通性越来越差,轮胎表面与空气的对流换热过程越来越弱;图 4-6 和图 4-7 中其他对流换热系数的突变点与轮胎表面几何形状的拐点相对应,在分析过程中对这些突变点予以剔除。

为简化分析,对 100℃ 到 150℃ 范围内的对流换热系数进行分区段取均值,确定不同区域的对流换热系数,如图 4-8 和图 4-9 所示。确定对流换热系数时,轮胎表面分为 8 个区域,各个区域的对流换热系数如表 4-1 所示。可见下半部分胎肩区域的对流换热系数最大,数值达到了 10.84,轮胎外表面上方最小,数值为 2.55。

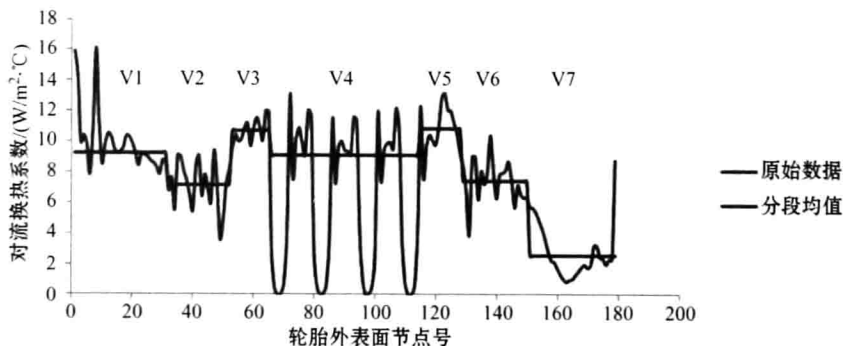


图 4-8 外表面分区前后数据对比图

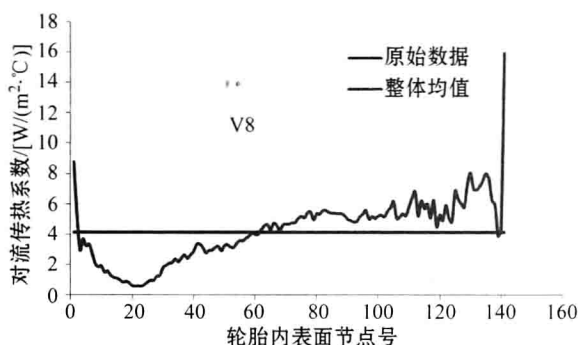


图 4-9 内表面分区前后数据对比图

表 4-1 CFD 法算出的轮胎不同区域的对流换热系数

轮胎具体区域	对流换热系数/ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))	轮胎具体区域	对流换热系数/ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))
V1	9.25	V5	10.84
V2	7.15	V6	7.42
V3	10.71	V7	2.55
V4	9.10	V8	4.14

#### 4.2.2 分区迭代法

在现有技术条件下,直接从试验角度验证 CFD 方法分析结果非常困难,故采用基于硫化测温试验的分区迭代法间接验证 CFD 法的正确性。分区迭代法求解轮胎对流换热系数的主要步骤如下:

##### 1) 分区并定义设计变量

一般根据轮胎结构、材料特性以及工程经验,进行多次分区试算,即使分析结果与试验吻合,也仅能够保证测点周围的精度,且由于硫化测温试验热电偶的测点布置在轮胎下半部分,故依据 CFD 法的结论,轮胎表面在特定的 5 个区域内(V1, V2, V3, V4, V8)对流换热系数可近似用均值来合理表征,可令这 5 个区域内对流换热系数分别对应  $h_1, h_2, h_3, h_4, h_8$ ,并定义为优化设计变量。



## 2) 变量约束

对设计变量进行离散约束:

$$h_1, h_2, h_3, h_4, h_8 \in \{0.5, 1, 1.5, \dots, 12.5, 13\} \quad (4-7)$$

## 3) 优化目标

以轮胎内部的3个不同位置(即胎肩、胎圈和胎冠)的测试点试验温度与计算温度差值最小为优化目标,如式(4-8)所示。

$$\min \sum_{i=1}^3 |T_{i\text{试验}} - T_{i\text{仿真}}| \quad (4-8)$$

式中,  $T_{i\text{试验}}$  为第  $i$  个测试点的试验温度;  $T_{i\text{仿真}}$  为第  $i$  个测试点的仿真温度。

## 4) 优化结果

基于可行方向法进行设计变量的迭代,最终得到如表4-2所示的轮胎不同区域的对流换热系数。

表4-2 分区法算出的轮胎不同区域的对流换热系数

轮胎具体 区域	对流换热系数/ (W/(m <sup>2</sup> · °C))	轮胎具体 区域	对流换热系数/ (W/(m <sup>2</sup> · °C))
V1	9	V4	9
V2	7	V8	4
V3	10.5		

### 4.2.3 求解方法对比讨论

由表4-1和4-2可知,两种方法得到的对流换热系数结果接近,无显著差别,间接证明了CFD法的正确性。但是,分区迭代法存在如下缺陷:①只能准确预测出热电偶周围的温度场分布,不能保证其他地方的精度,且该法需要进行温度测试,代价很高;②如果没有CFD计算结果参考,则需要根据轮胎表面轮廓和材料特征,进行多次分区试算,直至结果满足要求,分析精度依赖经验,结果存在较大随机性。虽然,从计算效率上来看,CFD法需要进行额外流场分析,但是从实用性和结果稳定性角度,CFD法直接可以通过计算机仿真获取对流换热系数,无需事先知道轮胎内部特征点的试验温度,具有较强的应用价值。



## 4.3 硫化数学模型解算思路与实现途径

在轮胎硫化过程中,由于热物性参数随着温度和硫化程度的变化而变化,因此很难得到解析解,使用计算机进行数值计算是一种有效方法。利用有限元思想,建立轮胎硫化过程空间物理模型,并对物理模型进行网格划分,根据初始和边界条件逐个向时间坐标轴计算和拓展,最后得出温度场、硫化程度和焦烧分布的变化规律。在求解策略的实现方法上,轮胎、胶囊、金属模具之间及其内部的热传导方程的求解利用 ABAQUS/Standard 求解器,再利用 FORTRAN 语言编制相应的硫化分析用户子程序用于计算焦烧时间、硫化速率、硫化程度和硫化放热,两者进行联合解耦仿真,最终得到轮胎硫化过程中的硫化传热特性参数。其中,当轮胎处在后硫化阶段时,金属模具和胶囊的自动去除使用到了单元钝化技术,同时,施加 4.2 节得到的对流换热系数。

### 4.3.1 模型解算思路

瞬态热传导方程同时是空间域  $\Omega$  和时间域  $t$  的函数,运用伽辽金法对方程进行近似求解。首先,将整个区域  $\Omega$  离散为有限个单元  $\Omega^e$ ,此时可令单元内任意一点温度  $T$  的试函数为

$$T = \sum_{i=1}^m N_i T_i \quad (4-9)$$

式中,  $N_i$  为该单元形函数(试函数的基函数),  $T_i$  为第  $i$  节点的温度值,  $m$  为该单元所含节点数目。在每个单元内,对式(4-1)积分后,再将式(4-9)代入积分式,此时式(4-1)可以离散成如下形式:

$$C\dot{T} + KT = P \quad (4-10)$$

式中,  $C$  为比热容矩阵,  $\dot{T}$  为节点温度对时间的导数矩阵,  $K$  为热传导矩阵,  $T$  为节点温度列阵,  $P$  为温度载荷列。接下来对式(4-10)进行时间域  $t$  的离散,即对式(4-10)中的  $\dot{T}$  项采用隐式向后差分法进行计算,见式(4-11):



$$\dot{T}_{n+1} = \frac{T_{n+1} - T_n}{\Delta t} \quad (4-11)$$

式中,下标  $n$  为增量步数,  $\Delta t$  为时间步长。将式(4-12)进一步代入式(4-10)得到最终离散表达式(4-12):

$$(C + \Delta t K) T_{n+1} = C T_n + \Delta t P \quad (4-12)$$

假设在某一时间间隔内温度不变,此时求解硫化程度时可以用时间积分的方法,即

$$\alpha_{t+\Delta t} = \alpha_t + \left( \frac{d\alpha}{dt} \right)_{t+\Delta t} \Delta t \quad (4-13)$$

式中  $\alpha_{t+\Delta t}$  可直接求出,因为  $\alpha_t$  为上一增量步计算值(已知量),而  $\left( \frac{d\alpha}{dt} \right)_{t+\Delta t}$  又可由混合动力学模型确定。

利用式(4-12)求解传热温度场,然后用式(4-13)得到硫化程度,并以此计算生热率,重复上述流程直至结束硫化模拟。

### 4.3.2 具体实现途径

根据上一节的离散与解耦的策略来研究实现方法,其中离散的策略需要使用有限元分析软件,而解耦的策略意味着单一的有限元分析软件无法完成求解,还需要在通用有限元软件基础上进行二次开发。因此,采用商业 CAE 软件 ABAQUS 的隐式求解器 Standard 及其用户自定义子程序 UMATHT 对轮胎硫化过程进行数值求解,其中作为主求解器的 Standard 用于计算轮胎、气囊、金属模具之间及其内部的热传导过程,由于 ABAQUS 自身无法描述材料的比热容和导热系数随硫化程度的变化,以及焦烧、硫化放热和硫化程度等特性,故根据第二章和第三章所推出的热物性参数模型、硫化动力学模型以及选取的焦烧和硫化反应热模型,运用 FORTRAN 编写程序嵌入到 UMATHT 中,并与 Standard 进行联合求解,其中 UMATHT 与 Standard 之间的关系见图 4-10 所示,在后硫化阶段,运用单元钝化技术自动去除金属模具和胶囊,使轮胎直接与空气进行对流换热。

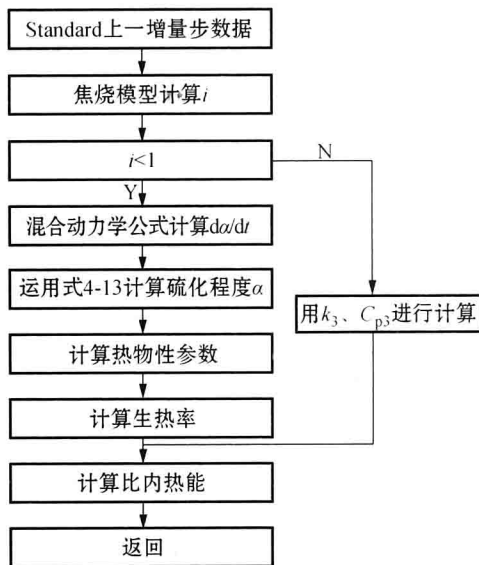


图 4-10 用户子程序 UMATHT 的计算流程

由于轮胎结构对称性,升温阶段轮胎上下部分硫化传热特性完全一样,在降温阶段下半部分轮胎与空气充分对流,降温速度较快,对利用余热硫化不利,因此仅取下半部分边界对轮胎进行计算分析。而在求解器联合求解之初,还需要对轮胎结构事先进行划分网格。轮胎是由多层橡胶和/或帘线橡胶复合体叠加而成的复杂变厚结构,故基于网格划分软件 HyperMesh 对其进行结构离散,主要步骤包括:

- (1) 绘出轮胎硫化系统的材料分界线。
- (2) 针对各部分材料创建相应平面。
- (3) 在相邻平面交界处创建共享边。
- (4) 在拐角处沿着材料分界线的法线方向分割平面。
- (5) 对轮胎硫化系统划分网格。

离散后的数值模型包含 1679 个轴对称传热单元(97%为四边形单元), 1769个节点,单元类型为 DC3D8(四边形)和 DC3D6(三角形),如图 4-11 所示。



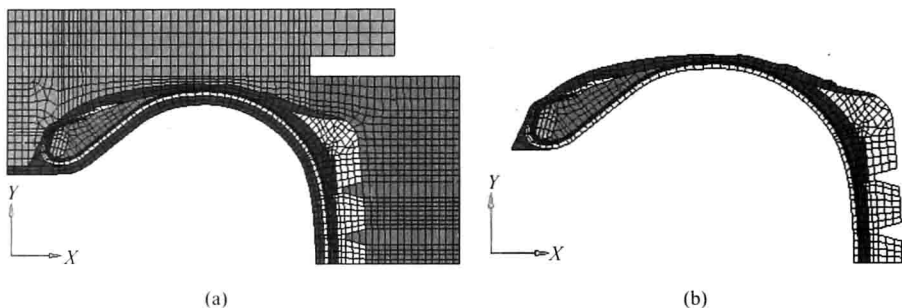


图 4-11 轮胎硫化网格模型  
(a) 机内硫化阶段 (b) 后硫化阶段

## 4.4 轮胎硫化测温试验研究

轮胎硫化温度测量方法主要包括:气泡点法、热电偶轮胎硫化测温法(简称测温法)以及这两种方法的组合使用。测温法与气泡法相比,具有以下特点:

(1) 测量手段专业,因为其测得值是通过相对较严谨的数学方法推算得到。

(2) 适用范围较广,对于任何种类和规格的轮胎的测温试验,该方法都可以使用,特别是在对大规格和高成本的轮胎的测温试验中更有效。

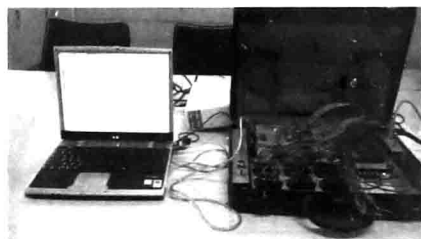
(3) 操作简单,市场上所销售的轮胎硫化测温仪已经具备了自动测温功能。

(4) 效率高,无需进行多次解剖分析和反复硫化。

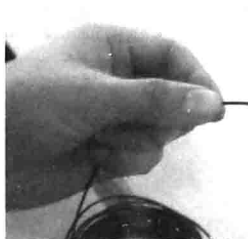
为此,本书选用测温法测试轮胎硫化过程中温度随时间的变化历程。

### 4.4.1 测温试验系统简述

试验仪器:硫化测温仪和计算机[见图 4-12(a)],自制热电偶[见图 4-12(b)],轮胎硫化机、轮胎和导线等。本试验系统中自制热电偶的测试精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ,数据的记录间隔时间为 20 s。



(a)



(b)

图 4-12 轮胎硫化测温设备

(a) 硫化测温系统 (b) 热电偶

#### 4.4.2 测温点植入位置选择

待测轮胎为某全钢子午线轮胎,测试轮胎在机内硫化阶段各个测温点的温度和后硫化阶段的温度。测温试验中选择一些具有代表性和受关注的点进行测量,比如胎圈区域(尤其是采用大三角胶的胎圈部位中的三角胶区域),胎肩区域(尤其对大型轮胎),第2、3带束层末端,带束层与胎面胶之间,带束层与胎体之间以及气密层接头处等多个关注区域。在试验现场的主成型轂上,向轮胎内部植入6个热电偶,其中,1<sup>#</sup>测温点处在反包端部,2<sup>#</sup>测温点处在胎侧外部,3<sup>#</sup>测温点处在垫胶中心,4<sup>#</sup>测温点处在带束层端部,5<sup>#</sup>测温点处在胎冠中心表面,6<sup>#</sup>测温点处在胎冠中心底部,图4-13给出了各测温点的具体位置,通过2<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>测点可以直观判断对硫化钢模表面所施加的温度边界是否合理。

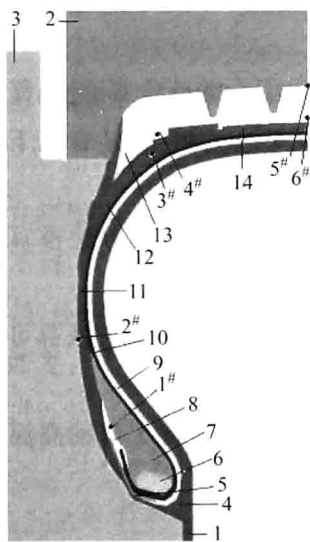


图 4-13 轮胎硫化测温点分布

1—胶囊;2—金属模具;3—金属模具;4—耐磨层;5—加强层;6—钢丝圈;7—三角胶;8—型胶;9—内衬层;10—胎体;11—胎侧;12—肩部垫胶;13—胎冠;14—带束层



### 4.4.3 测温试验具体步骤

硫化测温试验步骤如下:

(1) 埋热电偶。在成型过程中,将6个热电偶埋入轮胎内部相应关注区域[见图(4-13)],注意在埋线过程中为了防止信号之间发生干扰要保证测温导线不能相互搭接,另外导线的长度要够长,以便进行连线。

(2) 设备连接。首先对轮胎进行多次定型,用万用表检测自制热电偶是否能够正常工作。随后将待测轮胎快速装入硫化模具中,并且从模具侧板的孔洞中引出导线,最后将导线依据测温点编号与硫化测温仪的相应接口相连接,接通测温仪电源,同时与计算机相连。

(3) 温度测试和数据采集。首先设置好平板硫化机各个参数,调试好硫化测温软件。在完成各项准备工作之后,启动平板硫化机,采集各测温点温度数据。在整个轮胎硫化过程中,可以通过测温软件界面实时查看和监控各个测温点的温度数据,最终完成温度采集。

## 4.5 测温试验结果分析及模型验证

图4-14显示了在硫化过程中6个特征点试验与数值计算的温度历程,其中以1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>测温点作为对流换热系数分区迭代求法所使用到的试验数据。可见,在机内硫化阶段,由于金属模具具有较强的导热性能,使得金属模拟接触的轮胎外表面2<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>测温点温升最快,在800s左右温度接近蒸汽温度并保持不变,而轮胎内部越厚的地方温升越慢,如4<sup>#</sup>测温点的温升最慢,3<sup>#</sup>和6<sup>#</sup>测温点次之,且两点的温度历程较为接近,1<sup>#</sup>的温升最快;在后硫化阶段,机内硫化过程中温升越快的测温点温度下降越快,温升越慢的测温点温度下降越慢。

2<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>测温点分布在轮胎与金属模具的分界面上,由于水胎被高压过热水通过水囊强行压紧到模具内部表面需要一段时间才能稳定,因此800s之前的试验曲线波动较大,总体来说这两个测温点的试验温度和计算温度相差不大,说明在硫化钢模外表面所施加的温度边界条件是正确的,可以忽略轮

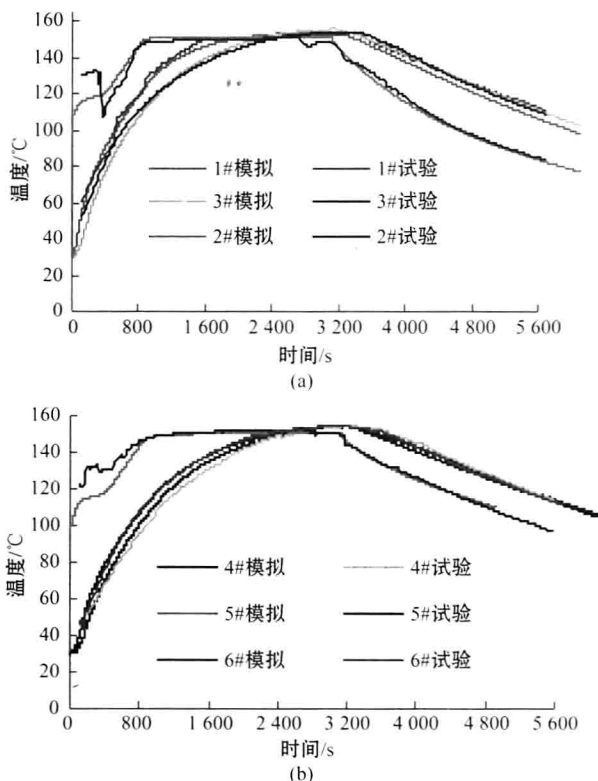


图 4-14 试验结果与数值结果对比

(a) 测点 1# 至 3# 的温度历程 (b) 测点 4# 至 6# 的温度历程

胎和钢模之间热阻的影响;1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>和6<sup>#</sup>测温点分布在轮胎内部,数值计算结果与试验结果吻合度也较高,说明本章所建立的硫化-传热耦合模型是正确的。

## 4.6 小结

首先建立和讨论了轮胎硫化过程的数学模型;针对降温阶段轮胎内外表面对流换热系数,分别使用 CFD 法、分区迭代法进行研究和对比分析;接着对数学模型的求解策略与策略实现途径进行了研究,通过开展对轮胎硫化测温



试验,对比和分析了理论与试验的温度数据。结论如下:

(1) 建立了轮胎硫化-传热耦合方程,包括轴对称热传导方程、多维热物性参数模型、混合定律模型、内生热模型、混合动力学模型和无量纲参数焦烧模型等 6 个控制方程,该方程分为机内硫化阶段和后硫化阶段两个子模型。

(2) 表面温度对轮胎-空气对流换热系数影响较小,对流换热系数在轮胎表明的分布呈现出“下大上小”的特征。依据对流换热系数的分布特点,对轮胎内外表面进行分区取均值,发现下半部分胎肩区域的对流换热系数均值最大,数值达到了 10.84,轮胎外表面上方均值最小,数值为 2.55。

(3) 利用 CFD 法中得到的分区,划分出设计区域,以测温点的试验值与仿真值偏差最小为目标,对对流换热系数进行迭代计算,最终得到相应设计区域内的系数值,其中最大数值为 10.5,整体与 CFD 法结果吻合良好,间接证明了 CFD 法的正确性,综合比较发现 CFD 法具有较强的应用价值。

(4) 通过对硫化数学模型中控制方程离散与解耦,提供了可进行计算机编程的数学模型求解流程,进一步给出了使用有限元软件 ABAQUS/Standard 求解器和其用户自定义子程序 UMATHT 进行联合仿真的仿真实现途径,并详细阐述了轮胎温度场与硫化场的强耦合过程。

(5) 轮胎硫化测温试验结果表明,在机内硫化阶段,与钢模接触的轮胎外表面测点温升最快,在 800 s 左右温度接近蒸汽温度并保持不变,而轮胎内部越厚的地方温升越慢;在后硫化阶段,机内硫化过程中温升越快的测温点温度下降越快,温升越慢的测温点温度下降越慢;试验结果与计算结果整体呈现出较好的一致性,说明所建立的轮胎硫化过程数学模型是正确的。



## 第 5 章

# 轮胎硫化传热特性及其影响规律

为了能够全面地分析轮胎硫化传热特性,本书将焦烧、温度场和硫化程度等作为硫化传热特性参数表征轮胎的硫化过程。为此,首先研究焦烧、硫化程度和温度等硫化传热特性参数的变化规律,在此基础上,分析工艺(包括水囊、初始温度和硫化介质温度等)和材料(热物性和硫化动力学)对轮胎硫化传热特性的影响。

64

## 5.1 轮胎硫化传热特性分析

### 5.1.1 温度场分析

图 5-1 和图 5-2 分别为在机内硫化阶段以及后硫化阶段轮胎内部温度场的仿真分析结果。由图 5-1 可知,在机内硫化阶段,热量由高温蒸汽所包围的硫化金属模具和内含高温高压过热热水的水囊传入轮胎内部,因此,轮胎内外表面温度首先升高,在轮胎内部尺寸较薄的胎侧区温升最快,其次是胎圈区域,然后为胎冠区,温升最慢的地方是胎肩。因为过水温度( $170^{\circ}\text{C}$ )高于蒸汽温度( $155^{\circ}\text{C}$ ),在 2000 s 之后热量从轮胎内表面向外表面逐渐推进,内衬层附近温度高于其他部位。

由图 5-2 可知,在后硫化阶段,轮胎被放置在空气中缓慢降温冷却,热量传递规律与机内硫化阶段相反,即尺寸较薄的胎侧区域温度下降最快,其次是胎圈区域,然后为胎冠区,降温最慢的地方是胎肩。由于轮胎外表面与空



气直接接触,空气流通性较好,因此降温速度较快;而轮胎内表面为半封闭区域,空气流通性较差,且存在辐射效应,因此,降温速度较慢。整个轮胎在硫化过程中的温度变化规律与试验结果一致。

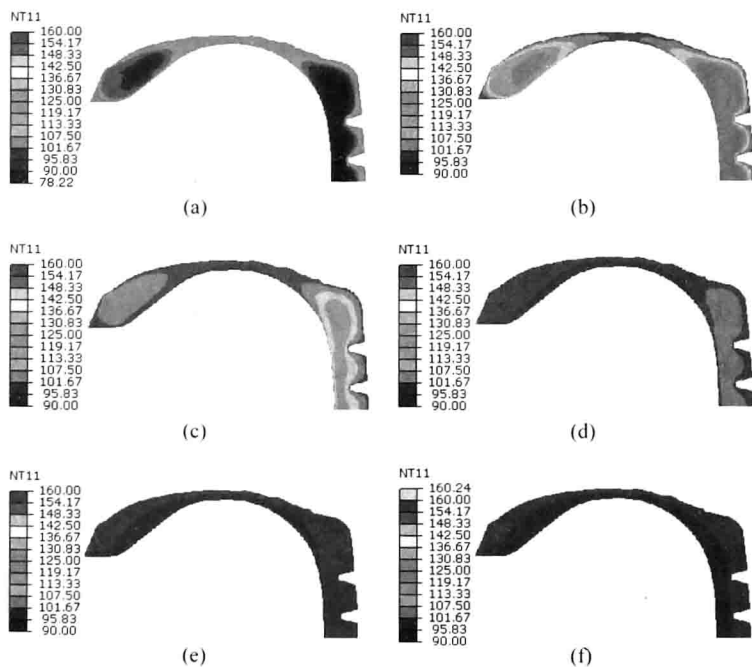
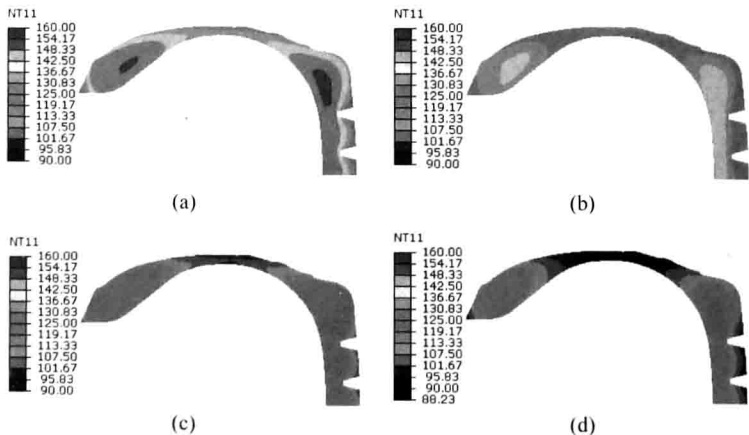


图 5-1 机内硫化阶段轮胎内部温度场的变化(°C)

(a) 500 s (b) 1000 s (c) 1500 s (d) 2000 s (e) 2500 s (f) 3120 s



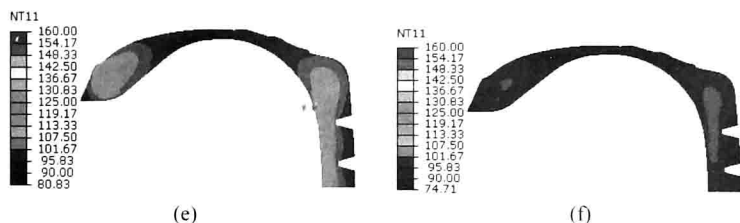


图 5-2 后硫化阶段轮胎内部温度场的变化(°C)

(a) 500 s (b) 1000 s (c) 1500 s (d) 2000 s (e) 2500 s (f) 3000 s

### 5.1.2 焦烧分析

通过无量纲参数数值(式(3-1))可以判断轮胎内部橡胶材料是否由焦烧期进入热硫化期,图 5-3 显示了轮胎开始发生硫化反应(56 s),胎侧进入热硫化期(304 s),胎圈、胎侧和胎冠区进入热硫化期(380 s),以及整个轮胎进入热硫化期(428 s)时的无量纲参数云图。由图 5-3 可知,温升较快的轮胎内外表面首先开始发生硫化反应,其次是尺寸较薄的胎侧,接着是胎冠和胎圈,最后开始发生硫化反应的是最厚的胎肩。然而,由于橡胶本身动力学特性的差异以及金属模具具有较高的导热系数,导致轮胎外表面比内表面先开始发生硫化反应。

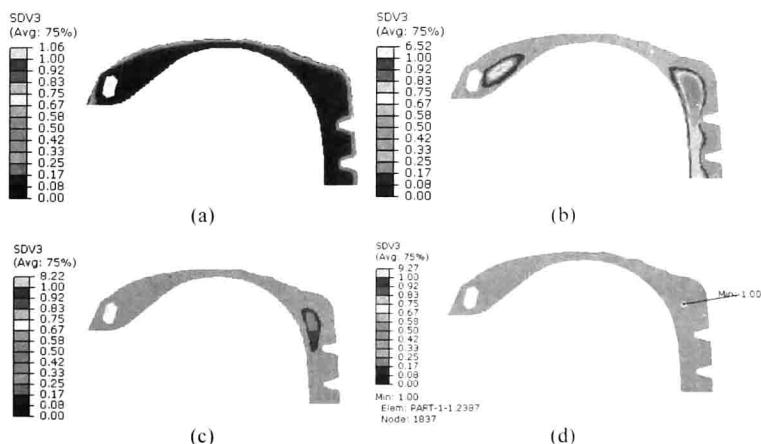


图 5-3 硫化过程中轮胎无量纲参数场的分布

(a) 56 s (b) 304 s (c) 380 s (d) 428 s





### 5.1.3 硫化程度分析

图 5-4 显示了 6 个时间点的轮胎硫化程度分布,当硫化程度为 1 时,表明此处的硫化反应已经完成。由图 5-4 可知,与平板硫化机接触的轮胎内外表面(特别是与胶囊接触的胎侧内表面)最先完成硫化反应,其次是温升较快的胎侧,而后再是胎圈和胎冠,最后完成硫化反应的是尺寸最厚的胎肩。

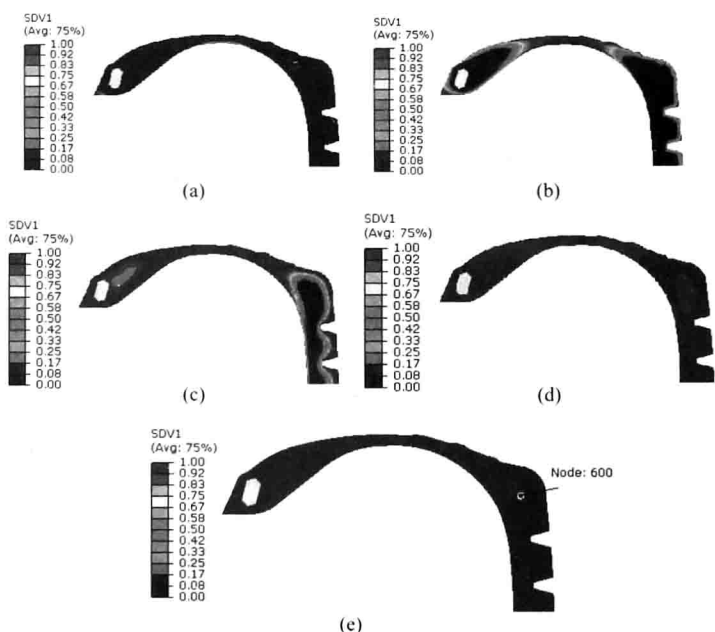


图 5-4 硫化过程中轮胎硫化程度场的分布

(a) 1500s (b) 2000s (c) 2500s (d) 3000s (e) 3120s

由数值计算可知,胎肩最难硫化的部位是 600 号节点(N600),此处的焦烧时间最长、温升最慢、硫化反应最后完成,该点的温度和硫化程度如图 5-4 所示。实际上,在进行硫化工艺设计时,把 N600 的硫化程度达到 70%时的时间(即工程正硫化时间,其余 30%的硫化程度靠出模后的余热来完成)作为轮胎在平板硫化机内的硫化时间更加有效可靠。因此,可以把 N600 焦烧时间( $t_i$ )、硫化时能够达到的最高温度( $T_{\max}$ )、硫化程度达到 70%时刻的时间( $t_{70}$ )作为评价轮胎硫化性能的指标。由图 5-4 和图 5-5 可知,在机内硫化结束



时 N600 的硫化程度为 92%(0.92), 而 N600 点的硫化程度达到 70% 时所对应的时间点为 2907 s, 因此, 可以把机内硫化时间调整为 2907 s, 总体硫化时间可以降低 213 s, 这样轮胎硫化生产率可以提高 6.8%, 调整前后 N600 的温度和硫化程度如图 5-5 所示。

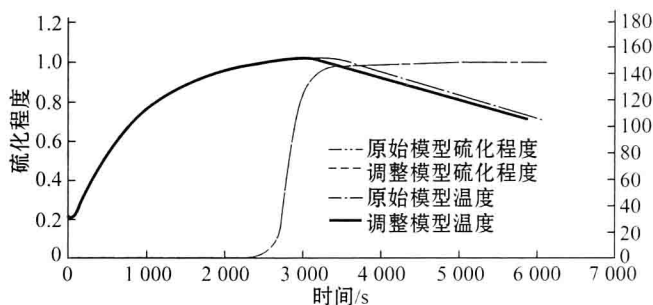
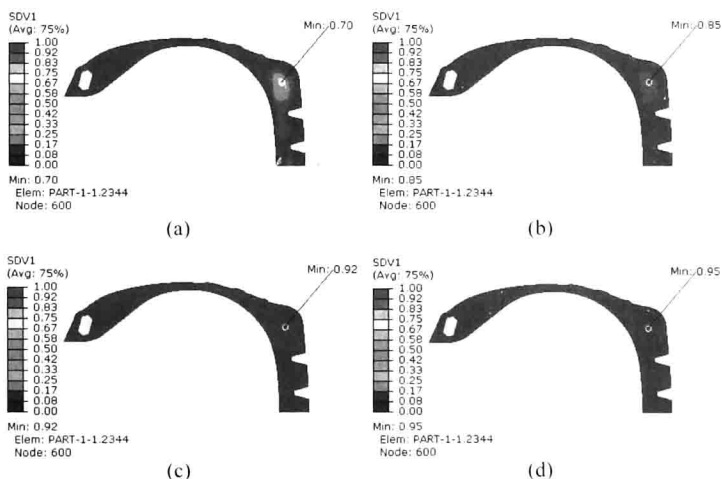


图 5-5 胎肩处 600# 节点温度和硫化程度历程

由图 5-5 和图 5-6 可知, 轮胎在刚出模时, 最难硫化部位的硫化程度为 0.7, 200 s 之后在余热的作用下, 硫化程度上升到 0.92, 而在 1000 s 左右, 该处的硫化反应基本结束, 硫化程度达到 0.99。可见, 采用工程正硫化时间  $t_{70}$  来估算轮胎的机内硫化时间具有一定的合理性。



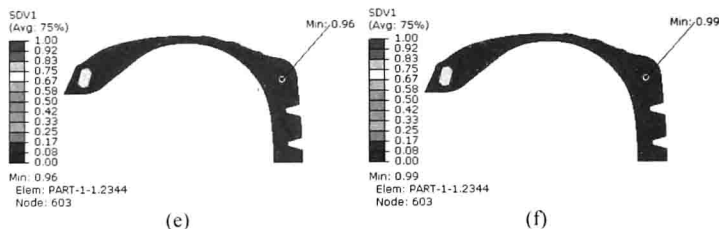


图 5-6 降温阶段的调整后的轮胎内部硫化程度

## 5.2 工艺影响规律研究

### 5.2.1 水囊的影响

为了研究水囊对轮胎硫化传热特性的影响,可把水囊厚度分为减少一半和去掉水囊两种情况,具体建模思路与第四章类似,在此只作简要叙述。其中,水囊厚度减半的方案可以通过调整水囊内表面节点坐标实现;去掉水囊的方案是借鉴 Pireli 公司无囊硫化专利的思路,即假设轮胎内圈中内衬层胶料已经硫化完毕,内衬层内表面与过热水直接接触,在建模时直接把内衬层定义为完全硫化橡胶。

计算结果如图 5-7 所示,无囊硫化和水囊减半的工程正硫化时间分别为 2267s 和 2591s,比原始模型分别减小了 21.9% 和 10.8%,可见水囊对轮胎的正硫化时间影响非常大。图 5-7 分别为无囊硫化、水囊减半和原始模型在达到工程正硫化时间时,轮胎断面硫化程度分布。可见,胎肩仍然是轮胎中最难硫化部位,随着水囊厚度减少,该处最难硫化点向钢模一侧转移;在胎冠部位,硫化反应不充分的区域面积减小,且总体向钢模一侧移动;在胎圈部位,由于无囊硫化和水囊减半方案的整体时间较短,硫化反应的程度不及原始方案充分,但在轮胎出模后可以利用余热继续完成硫化反应。

图 5-8 分别为无囊硫化、水囊减半和原始模型在达到工程正硫化时间时的轮胎断面温度场分布。由于过热水温度比蒸汽温度高 20℃,3 个模型所计算出的温度场分布类似,即轮胎内侧温度高于外侧温度,最大温度点分布在轮胎内侧。胎肩区域温度最小,随着水囊厚度减少,该处最小温度点移动到钢模-轮胎

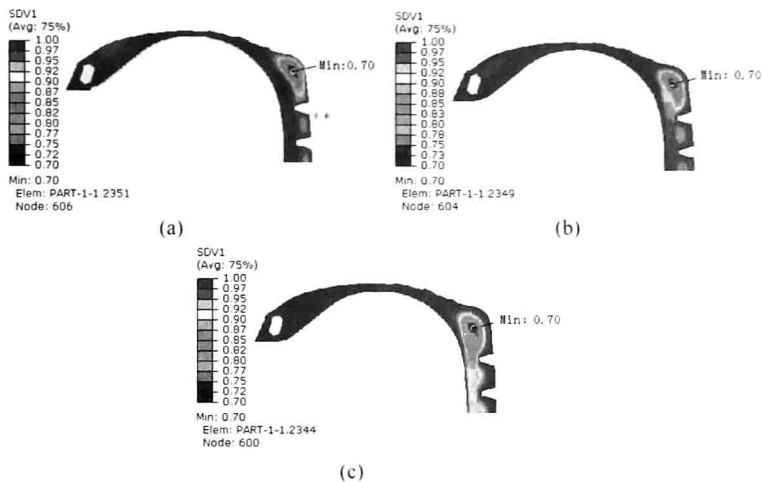


图 5-7 硫化程度对比

(a) 无囊硫化 2267s (b) 水囊厚度减半 2591s (c) 原始模型 2904s

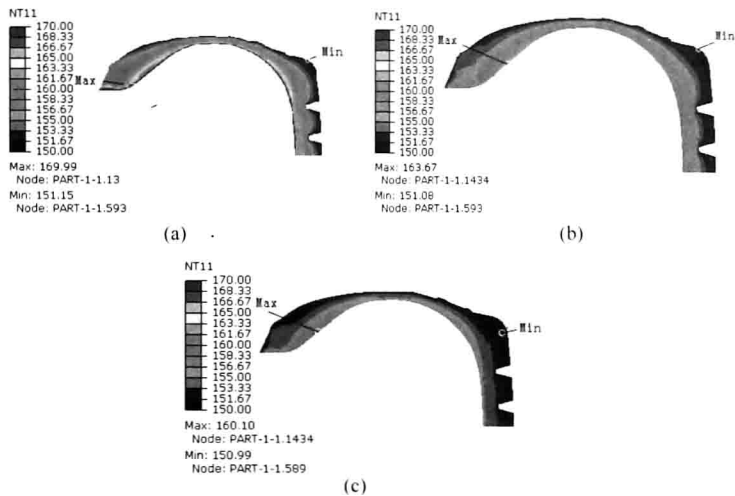


图 5-8 温度对比(°C)

(a) 无囊硫化 2267s (b) 水囊厚度减半 2591s (c) 原始模型 2904s

接触面上;轮胎低温区域面积减小,且总体向钢模一侧移动。经计算,在无囊硫化和水囊减半方案中,整个轮胎进入热硫化期的时间分别为 343s 和 387s,分别比原始方案减小了 19.9%和 9.6%。



可见,水囊厚度对轮胎工程正硫化时间、硫化程度、温度和焦烧时间等硫化传热特性影响非常大,采用无囊硫化方案,减小了该轮胎 21.9% 的工程正硫化时间以及 19.9% 的焦烧时间,大大提高了生产效率。

### 5.2.2 初始温度的影响

为了研究初始温度对轮胎硫化传热特性的影响,在第四章所建立的模型中分别把轮胎的初始温度调整为  $40^{\circ}\text{C}$  和  $50^{\circ}\text{C}$ 。 $50^{\circ}\text{C}$  和  $40^{\circ}\text{C}$  计算出的工程正硫化时间分别为 2825 s 和 2865 s,分别比原始模型减小了 2.7% 和 1.3%,图 5-9 分别为  $50^{\circ}\text{C}$  模型和  $40^{\circ}\text{C}$  模型在达到工程正硫化时间时,轮胎断面硫化程度分布。可见,硫化程度分布规律与原始模型一致,但在胎圈部位,初始温度的提高,使得整体硫化时间变短,硫化反应变得不充分。

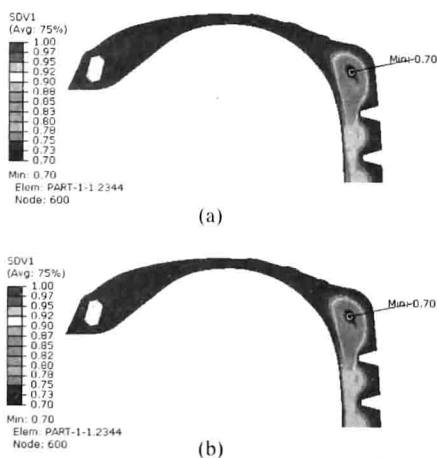


图 5-9 硫化程度对比

(a)  $50^{\circ}\text{C}$  模型 2825 s (b)  $40^{\circ}\text{C}$  模型 2865 s

而在达到工程正硫化时间时轮胎断面的温度场分布与原始模型基本相似,最小温度均为胎肩处 589 号节点,大小为  $150.99^{\circ}\text{C}$ ,最大温度为胎圈内表面的 1434 号节点,大小约为  $160^{\circ}\text{C}$ 。 $50^{\circ}\text{C}$  和  $40^{\circ}\text{C}$  对应的轮胎进入热硫化期时间分别为 305 s 和 365 s,分别比原始方案减小了 28.7% 和 14.7%。



### 5.2.3 硫化介质温度的影响

为了研究过热水和蒸汽对轮胎硫化传热特性的影响,在第四章所建立的硫化-传热耦合模型基础上,分别调整过热水的 47 min 恒定温度和蒸汽的 38 min 恒定温度在 150℃、160℃和 170℃3 个离散温度点上变化,如表 5-1 所示,共分析 9 种情况,其中 A1B3 与原始模型最为接近。

表 5-1 硫化介质温度范围

过热水	代号	A1	A2	A3
	温度/℃	170	160	150
蒸汽	代号	B1	B2	B3
	温度/℃	170	160	150

表 5-2 为 9 种工况计算出的轮胎工程正硫化时间,以及此时断面上硫化程度最小值所对应的节点号(具体位置参见图 5-10),图 5-11 为此时硫化程度分布云图。可见,在所有工况下,轮胎中最难硫化的部位均位于胎肩处的带束层端部,总体分布离水囊一侧较近,蒸汽温度对轮胎硫化影响比较大,这主要因为夹在过热水与轮胎之间是低导热性的水囊,而且具有较高导热性的带束层也靠近水囊一侧。表 5-2 对角线以上部分节点均在带束层左侧,这些区域很难利用余热进行后硫化;而在表 5-2 对角线以下部分节点(包括对角线)比较接近轮胎断面中心部位,这个区域具有良好的保温性能,可以有效保障胎肩的充分硫化。

表 5-2 工程正硫化时间

	A1		A2		A3	
	时间/s	节点号	时间/s	节点号	时间/s	节点号
B1	2424	1837	2536	1430	2672	1843
B2	2640	1839	2776	1837	2944	529
B3	2936	600	3096	599	3308	1837

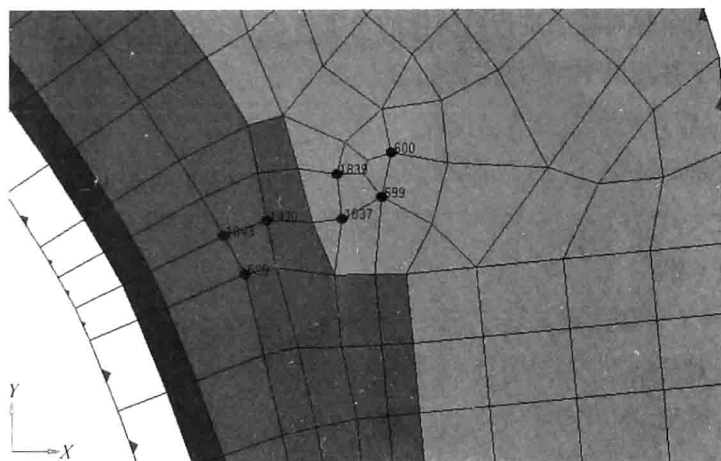


图 5-10 节点号

图 5-11 也进一步验证了上述结论,此外,在对角线以上部分,胎冠区左侧的橡胶硫化反应不充分,这些区域很难在轮胎出模后利用余热进一步硫化,可能严重影响该区域的物理性能;而在对角线以下部分,硫化反应不充分区域集中在胎肩内部,且胎冠区左侧的橡胶硫化反应相对比较充分,出模后基本达到 0.9 以上,因此,出模后可以进行较好的余热硫化;另外,对角线上的 3 个工况在上述两种情况之间。

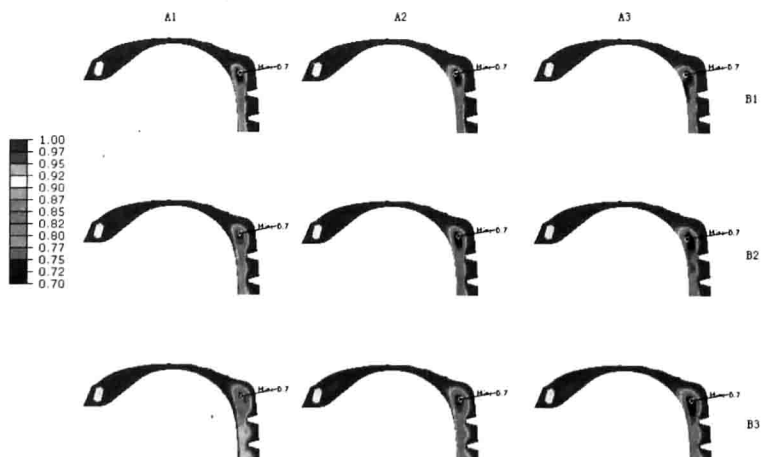


图 5-11 硫化程度对比云图



从利用余热对轮胎进行后硫化的角度考虑,轮胎出模时的硫化程度最小点应该位于其断面中间最好,因为橡胶是热的不良导体,此处橡胶温度下降最慢,可以较好地利用余热进行硫化;从提高轮胎硫化效率角度考虑,工程正硫化时间越短越好,这就要求硫化介质具有较高的温度,但高温硫化会造成能源损耗大,且往往会带来橡胶在硫化后期物理性能的变化(如返硫现象),需要慎重考虑。

表 5-3 为在达到工程正硫化时间时,轮胎断面的最小温度值以及此时最小值所对应的节点号(具体位置参见图 5-12),图 5-13 为此时温度场分布云图。可见,在所有工况下,轮胎中最小温度点均位于胎肩区的中分线两侧,离水囊较近的一侧分布较密,说明,蒸汽温度对轮胎硫化影响比较大,这也是因为夹在过热水与轮胎之间是低导热性的水囊,而且具有较高导热性的带束层也靠近水囊一侧。表 5-3 对角线以上部分节点均在轮胎内表面,对角线以下部分节点均匀分布在带束层左侧的胎肩处,对角线上的节点均为靠近 1<sup>#</sup>带束层一侧的 2<sup>#</sup>带束层端点。图 5-13 也进一步验证了上述结论,此外,硫化介质温度越高,轮胎断面平均温度越高,高温区也偏向高温硫化介质一层,这些分布规律也是判断能否进行有效余热硫化的重要因素。综上所述,可以根据上述思路采用分布区块法有效地进行蒸汽和过热水温度设计,即建立不同硫化介质温度下的硫化程度、工程正硫化时间和温度分布区块,结合硫化效率和质量等因素,合理匹配蒸汽和过热水的温度。

表 5-3 轮胎内部最低温度及其对应的节点编号

	A1		A2		A3	
	温度/℃	节点号	温度/℃	节点号	温度/℃	节点号
B1	161.44	525	159.08	450	154.96	451
B2	157.11	599	155.27	525	151.87	451
B3	150.13	592	149.72	606	148.02	525



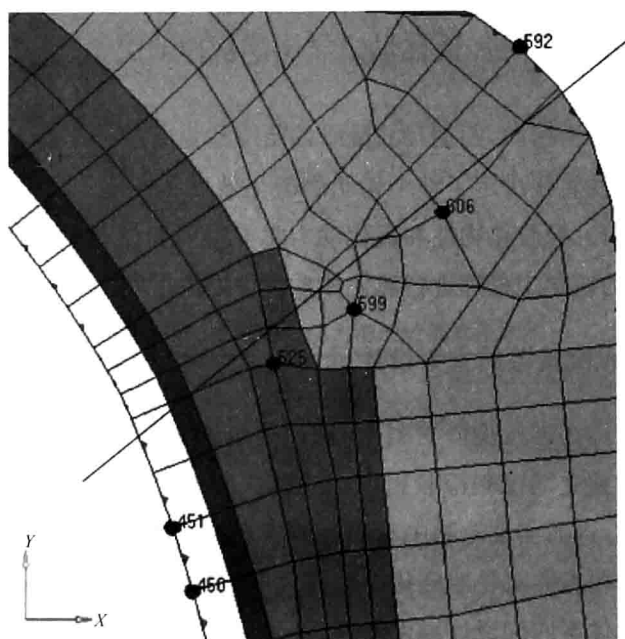


图 5-12 节点位置

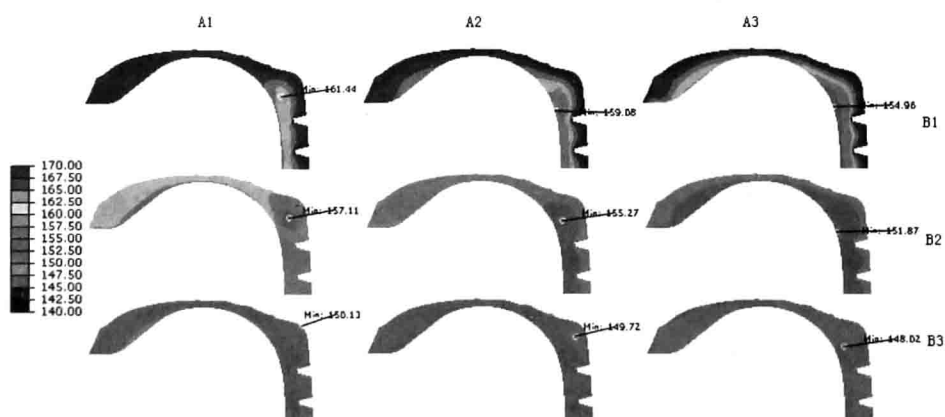


图 5-13 温度场对比云图(°C)



## 5.3 橡胶热物性和硫化动力学影响规律研究

由 5.1 节分析可知,断面尺寸最厚的胎肩是轮胎中最难硫化的部位,此处的硫化传热特性直接决定了整个轮胎的硫化效率和性能。为此,采用正交试验技术,重点研究橡胶热物性和硫化动力学参数对轮胎胎肩处硫化传热特性的影响规律,为硫化工程师进行硫化体系设计提供指导。

### 5.3.1 正交试验的方案设计

硫化工程师在进行橡胶材料配方设计时,通过调整硫化体系,可以在一定范围内相对独立地控制橡胶密度、比热容、导热系数、活化能、频率因子等材料参数变化,进而实现轮胎中不同橡胶材料之间硫化性能的良好匹配。通过研究这些材料参数对轮胎硫化传热特性的影响规律,为轮胎中不同橡胶材料之间的硫化体系匹配设计提供依据。

首先,进行轮胎中常用橡胶材料热物性和硫化动力学试验数据统计分析,并结合硫化工程师的实际经验,确定橡胶热物性参数和硫化动力学参数合理的变化范围,在橡胶材料热物性方面,密度变化范围设定为  $1\,078 \sim 1\,266 \text{ kg/m}^3$ ,导热系数变化范围设定为  $0.2 \sim 0.35 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ,比热容变化范围设定为  $1 \sim 2.5 \text{ kJ/kg}$ ;在橡胶硫化动力学方面,为了简化计算,选取 K-R 模型作为硫化动力学计算模型,  $A_1$ 、 $E_2/R$  设为 0,频率因子  $A_2$  的变化范围设定为  $596\,000\,000 \sim 728\,000\,000$ 、活化能与气体常数比值  $E_1/R$  的变化范围设定为  $8\,064 \sim 10\,080$ 。其次,为了简化计算,假设在硫化过程中,这些参数均为定值,且它们之间相互没有影响;同时假设靠近钢模一侧的胎面胶、胎侧胶为同一种材料,而靠近水囊一侧的带束层橡胶、胎体层橡胶、内衬层、胎肩垫胶为同一种材料;最后,分别开展热物性参数和硫化动力学参数对轮胎硫化传热特性影响规律的正交试验,相关设计因素及水平如表 5-4、表 5-5 所示。



表 5-4 橡胶热物性设计因素及水平

水平	钢模一侧热物性设计因素			水囊一侧材料热物性设计因素		
	密度 (a)kg/m <sup>3</sup>	导热系数 (b)W/(m·°C)	比热容 (c)kJ/kg	密度 (d)kg/m <sup>3</sup>	导热系数 (e)W/(m·°C)	比热容 (f)kJ/kg
1	1078	0.2	1	1078	0.2	1
2	1172	0.275	1.75	1172	0.275	1.75
3	1266	0.35	2.5	1266	0.35	2.5

表 5-5 橡胶硫化动力学设计因素及水平

水平	钢模一侧材料动力学设计因素		水囊一侧材料动力学设计因素	
	A2(a)/s <sup>-1</sup>	E1/R(b)/K	A2(c)/s <sup>-1</sup>	E1/R(d)/K
1	596000000	8064	596000000	8064
2	660000000	9072	660000000	9072
3	728000000	10080	728000000	10080

### 5.3.2 橡胶热物性的影响

在分析过程中,橡胶硫化动力学参数没有发生变化,故排除了橡胶硫化动力学因素的影响,由材料热物性决定的轮胎内部温度场是导致胎肩处硫化传热特性改变的唯一因素。此时假设轮胎传热方程中的密度,比热容和导热系数均为常数,不受硫化程度和温度的影响,以此来简化计算。正交试验方案设计及结果见表 5-6,可见,由于硫化机中的水囊热阻较大,钢模一侧材料热物性设计因素对工程正硫化时间  $t_{70}$  的影响明显高于水囊一侧材料热物性设计因素;通过对各因素极差值  $k$  进行比较,对正硫化时间的影响主次顺序为导热系数(b)>比热容(c)>密度(a)>比热容(f)>导热系数(e)>密度(d),见表 5-7。由此可知,在对热物性参数进行调整时,重点需要关注钢模一侧橡胶的热物性参数,其次是水囊一侧橡胶的比热容。

图 5-14 为热物性六个因素及其响应趋势,可见,随着钢模一侧橡胶密度、比热容以及水囊一侧橡胶比热容增加,胎肩工程正硫化时间呈明显增加趋势,钢模一侧橡胶比热容对工程正硫化时间影响最大;随着橡胶导热系数



增加,工程正硫化时间呈明显减小趋势,钢模一侧橡胶导热系数对工程正硫化时间影响较大;靠近水囊一侧橡胶密度与工程正硫化时间之间存在凹函数关系,由此可知通过该密度存在一个最优设计来改进胎肩部位的硫化传热特性;综上所述,提高胎面胶导热系数、降低胎面胶比热容,是减少工程正硫化时间的有效途径。

表 5-6 橡胶热物性试验方案及结果

试验号	a	b	c	d	e	f	$t_{70}/s$
1	1078	0.2	1	1078	0.2	1	2522
2	1078	0.2	1	1078	0.275	1.75	2559
3	1078	0.2	1	1078	0.35	2.5	2628
4	1078	0.275	1.75	1172	0.2	1	2640
5	1078	0.275	1.75	1172	0.275	1.75	2677
6	1078	0.275	1.75	1172	0.35	2.5	2743
7	1078	0.35	2.5	1266	0.2	1	2744
8	1078	0.35	2.5	1266	0.275	1.75	2780
9	1078	0.35	2.5	1266	0.35	2.5	2844
10	1172	0.2	1.75	1266	0.2	1.75	3197
11	1172	0.2	1.75	1266	0.275	2.5	3230
12	1172	0.2	1.75	1266	0.35	1	2899
13	1172	0.275	2.5	1078	0.2	1.75	3197
14	1172	0.275	2.5	1078	0.275	2.5	3208
15	1172	0.275	2.5	1078	0.35	1	2956
16	1172	0.35	1	1172	0.2	1.75	2341
17	1172	0.35	1	1172	0.275	2.5	2403
18	1172	0.35	1	1172	0.35	1	2095
19	1266	0.2	2.5	1172	0.2	2.5	3913
20	1266	0.2	2.5	1172	0.275	1	3597
21	1266	0.2	2.5	1172	0.35	1.75	3630
22	1266	0.275	1	1266	0.2	2.5	2736
23	1266	0.275	1	1266	0.275	1	2330
24	1266	0.275	1	1266	0.35	1.75	2416
25	1266	0.35	1.75	1078	0.2	2.5	2747
26	1266	0.35	1.75	1078	0.275	1	2472
27	1266	0.35	1.75	1078	0.35	1.75	2522



表 5-7 橡胶热物性各因素极差值比较

极差值	a	b	c	d	e	f
k1	2681.9	3130.6	2448	2756.8	2893	2695
k2	2836.2	2767	2792	2893.2	2806	2813.2
k3	2929.2	2549.8	3208	2797.3	2748	2939.1
k	247.3	580.8	416	136.4	145	244.1
主次顺序	$b > c > a > f > e > d$					

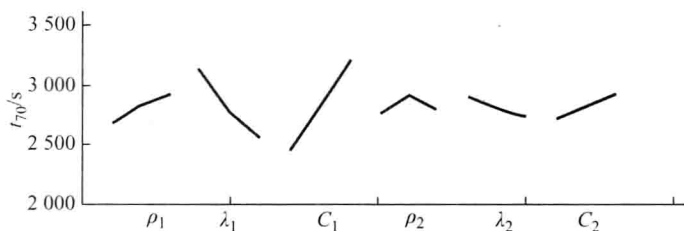


图 5-14 工程正硫化时间与热物性六因素关系图

### 5.3.3 橡胶硫化动力学的影响

由于在分析过程中,每个方案的橡胶热物性参数不变,且不考虑橡胶热物性和硫化动力特性之间的强耦合关系,因此,排除了热物性参数的影响,每个方案计算得出的轮胎内部温度场变化规律完全一样,橡胶硫化动力学是导致胎肩处硫化传热特性变化的唯一因素。正交试验方案设计及结果见表 5-8 和表 5-9,通过对各因素极差值  $k$  的进行比较,对工程正硫化时间的影响主次顺序为  $E1/R(d) > E1/R(b) > A2(a) > A2(c)$ ,可见在对硫化动力学参数调整时,重点需要考虑钢模一侧橡胶的活化能,其次是水囊一侧橡胶的活化能。图 5-15 为硫化动力学四个因素及其响应趋势,靠近钢模一侧橡胶频率因子与工程正硫化时间之间存在凸函数关系,而靠近水囊一侧橡胶橡胶频率因子与工程正硫化时间之间存在凹函数关系,由此可知通过频率因子存在一个最优设计来改进胎肩部位的硫化传热特性;随着活化能的增加,胎肩工程正硫化时间呈明显增加趋势,可见通过改变活化能可以轻而易举地实现工程正硫化时间调整。由此可知,改变频率因子可以获得最优设计来改进硫化传热特



性,降低橡胶活化能是减少工程正硫化时间的有效途径。

表 5-8 硫化动力学试验方案及结果

试验号	A2(a)	E1/R(b)	A2(c)	E1/R(d)	$t_{70}/s$
1	5.96E+08	8064	5.96E+08	8064	1189
2	5.96E+08	9072	7.28E+08	9072	2005
3	5.96E+08	10080	6.6E+08	10080	3473
4	6.6E+08	8064	7.28E+08	10080	3317
5	6.6E+08	9072	6.6E+08	8064	2005
6	6.6E+08	10080	5.96E+08	9072	3473
7	7.28E+08	8064	6.6E+08	9072	1917
8	7.28E+08	9072	5.96E+08	10080	3317
9	7.28E+08	10080	7.28E+08	8064	3473

表 5-9 硫化动力学各因素极差值比较

试验号	A2(a)	E1/R(b)	A2(c)	E1/R(d)
$k_1$	2222.333	2141	2659.667	2222.333
$k_2$	2931.667	2442.333	2465	2465
$k_3$	2902.333	3473	2931.667	3369
$k$	680	1332	466.6667	1146.667
主次顺序	E1/R(d)>E1/R(b)>A2(a)>A2(c)			

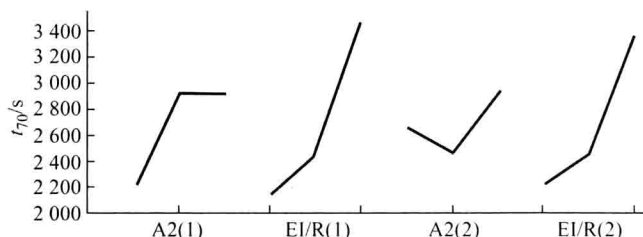


图 5-15 工程正硫化时间与硫化动力学四因素关系图

图 5-16 为 9 种试验方案在达到工程正硫化时间时,胎肩处的硫化程度云图。由图 5-16 可知,橡胶硫化动力学参数对胎肩处硫化程度分布规律影响非常大,在试验 4、试验 7、试验 8 中,胎肩最难硫化部位整体向水囊一侧转



移,其中试验7硫化均匀性较好;在其他试验方案中,最难硫化部位仍然靠近钢模一侧,试验1的胎肩硫化均匀性最好,试验3的硫化程度分布最为不均匀,效果最差。可见,橡胶硫化动力学特性直接决定了胎肩处的最难硫化部位分布、硫化均匀性、工程正硫化时间等硫化性能。

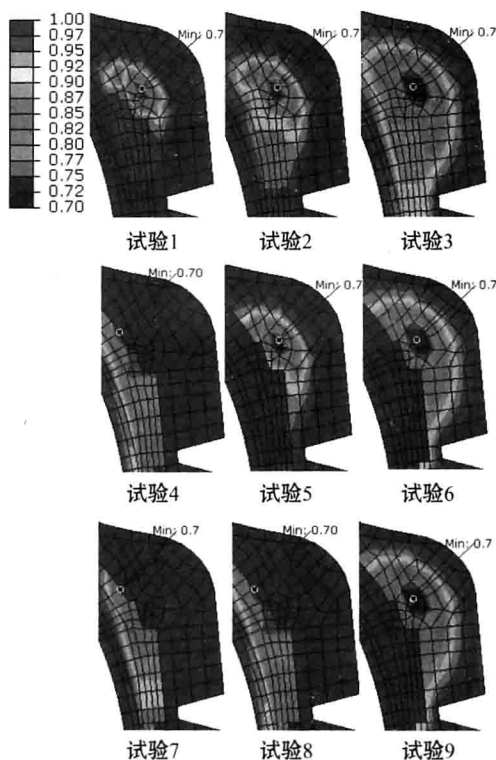


图 5-16 9 种试验方案硫化程度分布

## 5.4 小结

研究焦烧、硫化程度和温度等硫化传热特性参数的变化规律,在此基础上,分析水囊厚度、初始温度、介质温度、橡胶热物性和硫化动力学等因素对轮胎硫化传热特性的影响。结论如下:

(1) 在机内硫化阶段,轮胎内外表面温度首先升高,在轮胎内部,尺寸较



薄的胎侧区温升最快,其次是胎圈区域,然后为胎冠区,温升最慢的地方是胎肩,在 2000 s 之后热量从轮胎内表面向外表面逐渐推进,内衬层附近温度高于其他部位。在后硫化阶段,尺寸较薄的胎侧区域温度下降最快,其次是胎圈区域,然后为胎冠区,降温最慢的地方是胎肩;轮胎外表面降温速度较快,而轮胎内表面降温速度较慢。

(2) 轮胎内外表面首先开始发生硫化反应,其次是尺寸较薄的胎侧,接着是胎冠和胎圈,最后开始发生硫化反应的是最厚的胎肩,轮胎外表面比内表面先开始硫化反应。与平板硫化机接触的轮胎内外表面最先完成硫化反应,其次是温升较快的胎侧,而后是胎圈和胎冠,最后完成硫化反应的是尺寸最厚的胎肩。胎肩最难硫化的部位是其内部中间位置,可以把该处的焦烧时间、硫化时能够达到的最高温度、硫化程度达到 70% 时刻的时间作为评价轮胎硫化性能的指标;可以把现有硫化系统的机内硫化时间调整为 2907 s,轮胎硫化生产率提高 6.8%。

(3) 水囊对轮胎的正硫化时间影响非常大,无囊硫化和水囊减半的工程正硫化时间分别比原始模型减小了 21.9% 和 10.8%,胎肩仍然是轮胎中最难硫化部位,随着水囊厚度减少,该处最难硫化点向钢模一侧转移;在胎冠部位,硫化反应不充分的区域面积减小,且总体向钢模一侧移动。初始温度为 50℃ 和 40℃ 的模型计算出的工程正硫化时间分别比原始模型减小了 2.7% 和 1.3%,但此时的硫化程度和温度场分布规律与原始模型基本一致,这些模型最小温度均为胎肩中部,大小为 150.99℃,最大温度为胎圈内表面,大小约为 160℃。

(4) 在 9 种硫化介质温度工况下,轮胎中最难硫化的部位均位于胎肩处的带束层端部,总体分布离水囊一侧较近,轮胎中最小温度点均位于胎肩区的中分线两侧,离水囊较近的一侧分布较密,说明蒸汽温度对轮胎硫化影响比较大。在硫化程度分布区块中,在对角线以上部分,胎冠区左侧的橡胶硫化反应不充分,这些区域很难在轮胎出模后利用余热进一步硫化,而在对角线以下部分,硫化反应不充分区域集中在胎肩内部,出模后可以较好地利用余热进行硫化。在温度场分布区块中,对角线以上部分最小温度节点均在轮胎内表面,对角线以下部分节点均匀分布在带束层左侧的胎肩处,对角线上





的节点均为靠近 1# 带束层一侧的 2# 带束层端点。

(5) 采用正交试验技术,研究橡胶热物性和硫化动力学参数对轮胎胎肩处硫化传热特性的影响规律。结果表明,在对热物性参数进行调整时,重点关注钢模一侧橡胶的热物性参数,其次是水囊一侧橡胶的比热容,提高胎面胶导热系数、降低胎面胶比热容,是减少工程正硫化时间的有效途径;橡胶硫化动力学参数直接决定了胎肩处的最难硫化部位分布、硫化均匀性、工程正硫化时间等性能,改变频率因子可以获得最优设计来改进硫化传热特性,降低橡胶活化能是减少工程正硫化时间的有效途径。



## 第 6 章

# 轮胎硫化专用软件开发

84

轮胎硫化是橡胶交联反应和热量传递交替影响的多场耦合问题,主要采用自编专用程序、通用有限元程序求解计算。专用程序建模专业化程度高,但求解效率、精度和后处理便捷性均低于通用有限元程序;通用有限元程序前、后处理功能强大,求解效率、精度高,但是材料模型不完善,往往需要二次开发。为此,首先分析了常用的子午线轮胎硫化工艺特点,在充分理解子午线轮胎硫化工艺的基础上,结合本书全钢子午线轮胎硫化的研究成果,综合考虑专用程序和通用有限元程序的优缺点,基于 Visual Basic 编程语言进行 Windows 环境下的轮胎硫化专用软件开发,旨在实现子午线轮胎硫化过程的多场耦合建模和仿真的智能化及专业化。

### 6.1 子午线轮胎硫化工艺简述

子午线轮胎的定型过程在其成型以后基本完成,钢丝帘线的伸长率仅为 2%~3%,周向很难伸张。一般来说,全钢丝子午线轮胎或纤维胎体、钢丝帘布带束层的子午线轮胎采用活络模硫化才能保证制造高质量轮胎的要求。

子午线轮胎的硫化工艺具有如下特点:

(1) 必须采用硫化机进行硫化,对于胎圈 16 inch 以下的子午线轮胎,多采用 A 型胶囊硫化机,规格大于 16 inch 的子午线轮胎,多采用 B 型胶囊硫化机进行硫化。

(2) 由于子午线轮胎的定型过程在其成型以后已经完成,钢丝带束层会



把胎体紧紧箍住,采用活络模硫化模型对其进行硫化。

(3) 一般一次定型压力为  $30\sim 50\text{ kPa}$ ,二次定型压力为  $60\sim 80\text{ kPa}$ ,此外还要精确计算定型高度。

(4) 一般半钢丝子午线轮胎的硫化内压不得低于  $2156\text{ kPa}$ ,全钢丝子午线轮胎硫化时的内压要达到  $2646\text{ kPa}$  以上的压力。

基于上述特点,在对一般子午线轮胎进行硫化仿真时,仍然可忽略硫化过程中材料流动对轮胎尺寸和结构的影响,以及钢模与轮胎、胶囊与轮胎之间的热阻。

轮胎硫化所需的热量是由两方面获得:一是由蒸汽从模型的外部向模腔内传递;二是由轮胎硫化胶囊内的硫化介质提供。目前常用的硫化介质主要有热水、蒸汽、惰性气体。硫化介质及其装置的作用效果应完全满足轮胎硫化工艺的温度、压力、含氧量的基本条件,同时需要考虑节约能源、降低成本、保证质量及完全可靠等因素。可见,在对子午线轮胎进行硫化仿真时,也可以采用本书的边界简化思路,即在硫化介质接触面上施加第一类边界条件。

## 6.2 轮胎硫化专用软件总体设计思路

有限元分析通用软件(如 HyperWorks 和 ABAQUS)的理论性、专业性很强,若要求设计人员在短时间内熟练掌握并操作这些软件是比较困难的,通用有限元分析软件的材料模型往往需要二次开发;专用程序求解效率低、精度不易控制、后处理便捷性较差,一般局限于特定企业内部使用,不对外共享;而轮胎硫化的建模分析流程又具有共性,所以基于上述子午线轮胎硫化的结构特点、设计理论和有限元仿真方法进行轮胎硫化专用软件开发,定制专用的人机交互界面和专用的有限元专用软件,使工程技术人员更专注于轮胎产品的改进和研发,具有重要的现实意义和工程应用价值。

为了规范轮胎硫化分析过程,本着操作简便、分析专业、使用智能的原则,根据子午线轮胎的硫化特征,采用微软公司 Visual Basic(VB)软件开发了一套子午线轮胎硫化分析专用系统。该软件的主要功能是实现轮胎硫化分



析过程的自动化和专业化,具体开发思路如图 6-1 所示,首先需要第三方网格划分软件 HyperMesh 对轮胎进行网格划分,然后该软件读取网格文件,并做相应的处理,最后直接后台调用 ABAQUS/Standard 求解器对轮胎硫化热传导方程进行求解计算。

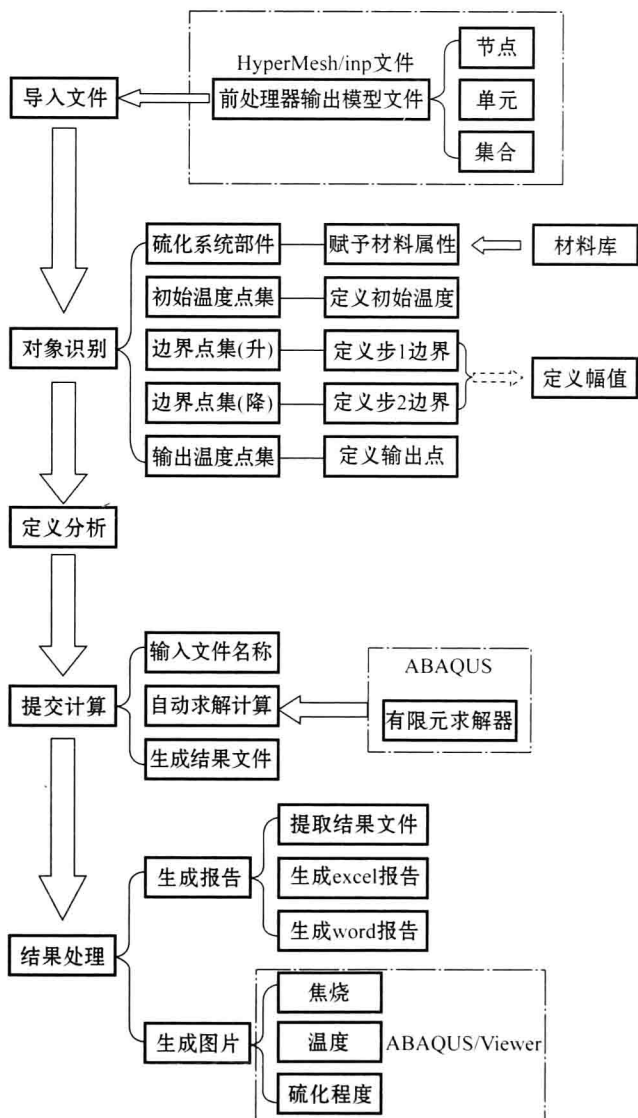


图 6-1 子午线轮胎硫化专用软件开发流程图



该专用系统代替了 ABAQUS 的前处理功能,将在 ABAQUS 需要设置的参数集成到一个界面上进行设置。首先利用 HyperMesh 对轮胎模型进行网格划分,然后使用该软件读入网格文件,识别并提取网格文件中的模型数据,并将提取结果显示在人机界面中便于操作者对参数进行定义赋值,之后通过程序的文件模板生成 ABAQUS 计算所需要的输入文件(INP 文件),最后调用 ABAQUS/Standard 求解器进行求解计算,计算完成后,除了生成 ABAQUS 自带的结果文件外,该系统还提供了相应的后处理操作,通过已生成的结果文件进行相应的数据处理。该硫化专用软件结合本书全钢子午线轮胎硫化研究的成果和一般子午线轮胎的硫化工艺特点进行了自主开发,解决了轮胎在硫化过程中交联反应-温度场的完全耦合问题,为橡胶制品硫化的模拟分析工作提供了很大的帮助,实现轮胎硫化过程的多场耦合建模和仿真的智能化及专业化。

所开发的专用软件与 Altair 公司的 HyperMesh 模块是无缝对接,直接识别 HyperMesh 所产生的网格、节点和集合,包括:硫化系统部件、初始温度点集、边界点集和输出温度点集等。

该软件可完成以下功能:

(1) 把识别出的硫化系统部件自动连接到预先定义好的材料库上,同时操作人员可以根据具体情况自行选择材料库,而且可以对系统的材料库进行扩充。

(2) 对识别出的轮胎、水囊、金属模具等初始温度集合自动赋予默认的温度,同时操作人员可以手动调整。

(3) 对识别出的水囊、金属模具的升温边界集合自动赋予默认的温度历程,同时对识别出的轮胎的降温边界集合自动赋予默认的对流换热系数,而且操作人员可以手动调整。

(4) 定义输出温度历程点集和硫化程度历程单元集并自动输出其结果数据。

在分析求解方面,可以设置分析时间、步长、最大允许分析时间、最小允许分析时间等参数,同时自动生成 ABAQUS 软件的计算文件(即 INP 文件),自动调用 ABAQUS/Standard 求解器进行轮胎硫化-传热耦合求解;求解结束以后,程序会自动生成输出温度点集的温度历程图和输出硫化程度单元集的



硫化程度历程图,并可生成 Excel、Word 报告;为了获得焦烧、温度、硫化程度云图,程序可以自动把计算结果在 ABAQUS/Viewer 中打开,便于操作者查看或打印轮胎硫化传热特性云图。

## 6.3 轮胎硫化专用软件模块设计与实现

轮胎硫化专用软件由自动识别信息模块、材料库配置模块、前处理模型信息配置模块、求解及后处理模块等组成。

### 6.3.1 信息自动识别模块

HyperMesh 将所产生的网格、节点和集合等对象保存到 \*.inp 文件中,这些对象表示图形实体。INP 文件是一个基于关键词格式的文本文件,可以非常方便地对它进行修改。本系统共涉及两个 INP 文件,一个是需要导入的 INP 文件(INP 网格文件),另一个是要生成的 ABAQUS 前处理文件(INP 前处理文件也叫计算文件)。INP 网格文件是整个分析过程的信息来源,利用 VB 程序访问该 INP 文件,可以在 INP 文件不打开的情况下,将其中的字符串信息自动检索、提取出来。

主要功能代码如下:

.....

Open filename For Input As #1 '打开 \*.inp 文件

Do While Not EOF(1) '遍历 #1 文件

Line Input #1, temp '将下一行字符串附 temp

target = "ELSET=" '设定检索目标

pos = InStr(1, temp, target) '获取检索目标位置

.....

Loop

专用软件运行中,程序在后台打开 HyperMesh 导出的 \*.inp 网格文件,然后逐行遍历检索目标字符串,获取目标后,将结果存入一个数组,直至遍历整个文件为止。最终硫化系统部件点集、初始温度点集和边界点集被检索出



来并分别放入 3 个数组,然后分别显示在系统界面的对应模块。

### 6.3.2 材料库配置模块

该专用软件提供了两种材料库:一种是 ABAQUS 自带的材料库,直接通过定义材料即可;另一种是需要用户再定义的材料库,即用户材料子程序,下面将作具体介绍。

有些情况下,由于 ABAQUS 材料库中没有轮胎硫化所需要的全部材料模型,故需要用户自己定义用户材料属性。用户材料子程序(UMATHT)通常用 FORTRAN 语言的代码写成,是 ABAQUS 提供给用户自定义材料属性的 FORTRAN 程序接口,通过该接口实现与 ABAQUS 的数据交流。

通过图 6-2 中的界面来选择确定是否调用子程序进行计算,若需要调用用户材料子程序,点击“确定”后,进入如图 6-3 所示的子程序选择框,浏览选择材料子程序,点击确定后进入如图 6-5 所示系统程序主界面;若不需要调用材料子程序,则跳过子程序选择框,直接进入系统程序主界面。在主界面对各个参数进行定义,然后点击“生成模板文件”,而后提交计算。利用用户材料子程序计算时,可以利用 ABAQUS 执行程序,在执行程序中应用 user 选项指明包含这些子程序的 FORTRAN 源程序或者目标程序的名字。即该软件不需要打开 ABAQUS 软件的运行界面,只需在 ABAQUS Command 窗口中输入 ABAQUS 执行程序即可直接运行。

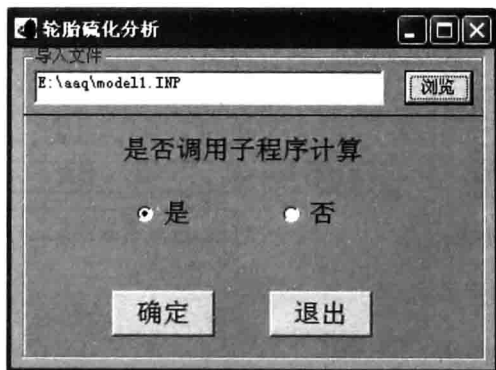


图 6-2 调用子程序判断界面

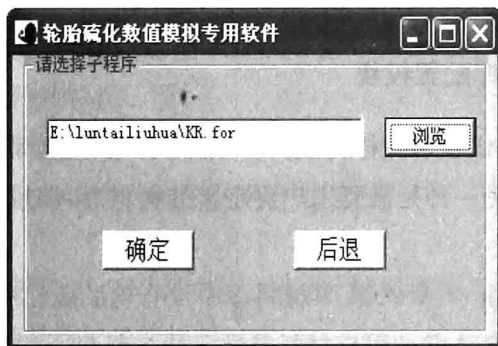


图 6-3 子程序选择界面

### 6.3.3 模型前处理信息配置模块

ABAQUS 的计算文件的扩展名为 \*.inp, 该文件包含对整个模型的完整描述, 在前处理器和求解器之间建立了一个传递数据的桥梁。

#### 1) INP 文件的结构

一个输入文件由模型数据和历程数据组成。模型数据的作用是定义一个有限元模型, 包括有关节点、单元、单元性质和材料属性等有关说明模型自身的数据。历程数据也称历史数据, 是定义模型发生了什么, 包括分析过程的定义, 载荷的定义以及输出的定义等。具体结构如图 6-4 所示。

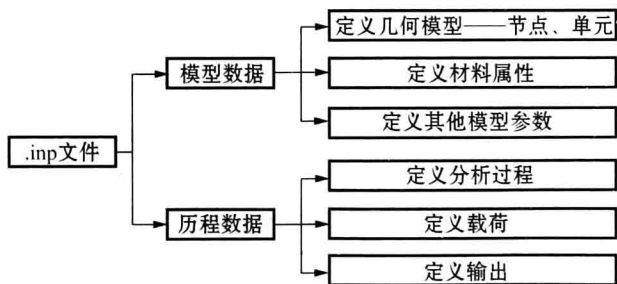


图 6-4 Inp 文件结构

#### 2) INP 文件的格式及参数化

INP 文件有其特定的格式, 一般由关键字行与数据行组成。关键字行以





一个“\*”和关键字开头,后面跟着选项名,可以包含若干必需的和可选的参数以及它们的值,以逗号隔开;数据行是为给定选项定义数据,例如单元定义;关键字行可以包含许多与之相关的数据行。例如,可以利用单元选项数据块,通过指定单元数据类型、单元号和节点连接关系定义单元,如下所示:

\* ELEMENT,TYPE=DCAX4,ELSET=SIDEWALL

1982, 830, 831, 828, 829

1983, 831, 832, 827, 828

由于 INP 文件有特定的格式要求,所以为建立一个 INP 模型文件并实现该文件的参数化提供了很好的基础。图 6-5 为本系统程序的主界面,其中材料单元集、初始温度点集、边界点集阶段温度、边界温度历程和仿真时间等名称,及其对应的参数值需要被设置为参数。材料库可以进行扩充,若要进行扩充,点击菜单栏“文件”下拉菜单中的“添加材料库”,弹出如图 6-6 所示的材料库添加界面,在该界面中选择要添加的材料库,点击“添加”即可。返回程序主界面中,添加的材料库已存在于“材料库”的下拉菜单中。添加材料库实际上是添加一个包含许多材料属性的文本文件,该文件有其严格的格式,以供程序准确读取文件中的材料属性。

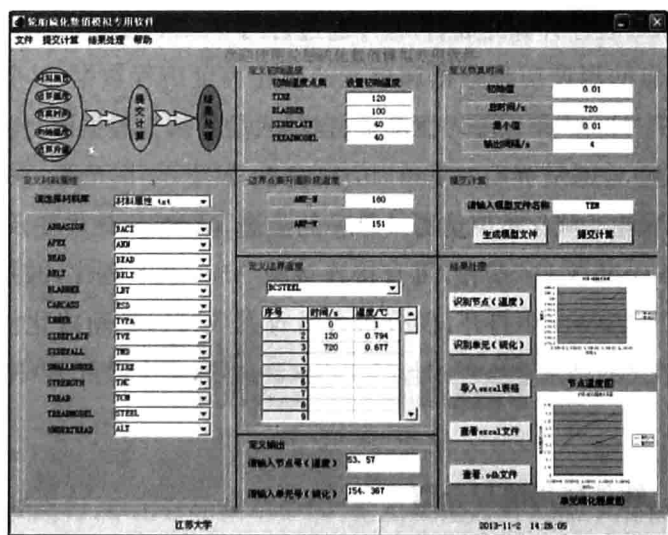


图 6-5 系统程序主界面

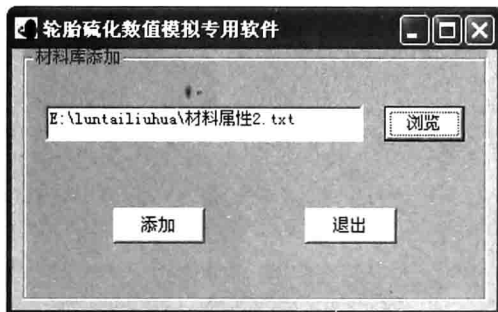


图 6-6 材料库添加界面

### 6.3.4 解算及后处理模块

在程序生成一个 ABAQUS 的计算文件后,程序将自动建立一个批处理文件,并自动写入一行命令来调用求解器进行计算,命令如下:

```
Call abaqus job=TEM user=KR. for int
```

此行命令将以文件名为 TEM 的文件作为 ABAQUS 软件的计算文件,以文件名为 KR. for 的文件作为材料子程序,然后调用 ABAQUS/Standard 求解器进行求解计算。

ABAQUS 程序计算完成后,程序通过访问 \*. dat 结果文件,可提取出所要查看的节点的温度历程数据和单元的硫化程度历程数据,并将数据导入 Excel 文件中,Excel 在程序的驱动下,以导入的数据为数据源自动生成散点图,并将其显示在系统界面右下角以方便查看,如图 6-5 所示。另外,为了方便快捷地查看轮胎硫化数值仿真结果中的焦烧、温度、硫化程度云图,程序设置了“查看 \*. odb 文件”按钮,可直接连接到 ABAQUS 程序,并把计算结果在 ABAQUS/Viewer 中打开,供分析人员查看或打印轮胎硫化传热特性云图。可见,最终的结果输出形式包括了 Excel 文件(内含散点图)和 ABAQUS 结果文件。

### 6.3.5 软件使用流程介绍

(1) 运行环境:在 Windows XP、Windows7 等常见操作系统上且电脑上



装有 ABAQUS 软件。

(2) 安装:本软件以 VB6.0 作为开发语言,程序编辑完成后,利用 Setup Factory 7.0 打包软件对编好的程序进行打包,最后得到一个安装文件 setup.exe,安装时只需双击该安装文件即可开始安装。如图 6-7 所示为安装时的一个界面,说明软件的版权和软件安装协议,同意本协议后可进入下一步,然后根据安装提示可顺利进行快速安装。

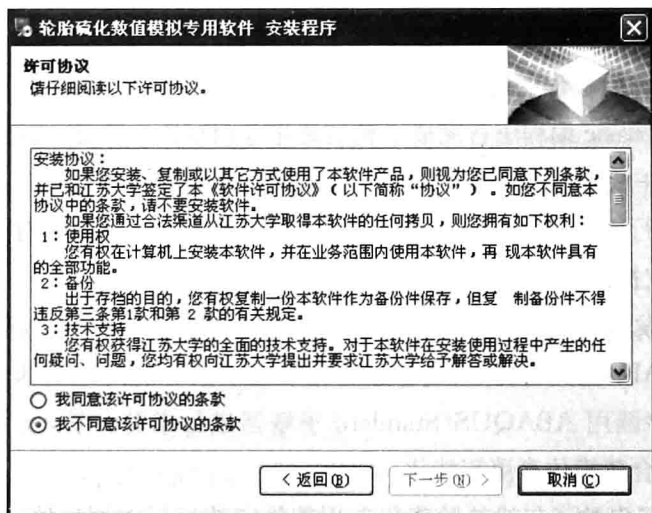


图 6-7 安装许可协议框

(3) 卸载:在开始菜单下的“轮胎硫化数值模拟专用软件”子菜单下,有“卸载轮胎硫化数值模拟专用软件”的菜单,单击后即开始卸载操作,如图 6-8 所示。然后进入卸载提示框,然后根据窗口提示可成功将该软件卸载,方便快捷。

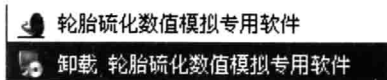


图 6-8 卸载菜单

(4) 系统运行:单击开始菜单中的“轮胎硫化数值模拟专用软件”子菜单下的“轮胎硫化数值模拟专用软件”可快速启动本软件,如图 6-9 所示。



图 6-9 运行菜单

## 6.4 小结

首先分析了目前常用子午线轮胎的硫化工工艺特点,在此基础上结合本文全钢子午线轮胎硫化的研究成果,综合了专用程序和通用有限元程序优点,基于 Visual Basic 编程语言完成了轮胎硫化专用软件的开发,所得结论如下:

(1) 子午线轮胎的定型压力和硫化内压较高,一般采用具有活络模的胶囊硫化机进行硫化,常用的硫化介质主要有热水和蒸汽,因此,对其进行硫化仿真时,本文提出的若干模型简化假设仍然成立。

(2) 开发了一套子午线轮胎硫化专用软件,与 HyperMesh 软件无缝连接,代替了 ABAQUS 软件完成轮胎硫化数值模拟的前处理和部分后处理工作,利用程序调用 ABAQUS/Standard 求解器进行求解计算,使轮胎硫化过程的多场耦合建模仿真更智能化。

(3) 所开发的子午线轮胎硫化专用软件安装运行方便快捷,用户界面友好,主要包括自动识别信息模块、材料库配置模块、前处理模型信息配置模块、求解及后处理模块等 4 个模块,实现了轮胎硫化过程多场耦合建模和仿真分析的自动化及专业化。



## 附录 1

# 轮胎硫化 INP 主体程序代码

\* \* 程序开始

\* Heading

\* \* 定义节点编号及其相应的坐标

\* NODE

1, 0.305397137954, 0.0871587840585//节点号,X 方向坐标,Y 方向坐标

.....

\* \* 定义耐磨层 6 三角形单元及其节点号

\* ELEMENT,TYPE=DCAX3,ELSET=ABRASION

1, 1330, 1335, 1336//单元编号,1#节点,2#节点,3#节点

.....

\* \* 定义过渡胶 10 三角形单元及其节点号

\* ELEMENT,TYPE=DCAX3,ELSET=APEX

2107, 1334, 1333, 1271//单元编号,1#节点,2#节点,3#节点

.....

\* \* 定义胎体层 11 三角形单元及其节点号

\* ELEMENT,TYPE=DCAX3,ELSET=CARCASS

709, 1553, 1520, 1515//单元编号,1#节点,2#节点,3#节点



.....

\* \* 定义内衬层 12 三角形单元及其节点号

\* ELEMENT,TYPE=DCAX3,ELSET=INNER

884, 1641, 1667, 1669//单元编号,1#节点,2#节点,3#节点

886, 1524, 21, 1510

.....

\* \* 定义金属模具 2 三角形单元及其节点号

\* ELEMENT,TYPE=DCAX3,ELSET=SIDEPLATE

966, 792, 894, 932//单元编号,1#节点,2#节点,3#节点

.....

\* \* 定义胎侧 13 三角形单元及其节点号

\* ELEMENT,TYPE=DCAX3,ELSET=SIDEWALL

1981, 593, 830, 829//单元编号,1#节点,2#节点,3#节点

.....

\* \* 定义垫胶 9 三角形单元及其节点号

\* ELEMENT,TYPE=DCAX3,ELSET=SMALLRUBER

3471, 1429, 1428, 1427//单元编号,1#节点,2#节点,3#节点

.....

\* \* 定义胎冠 15 三角形单元及其节点号

\* ELEMENT,TYPE=DCAX3,ELSET=TREAD

2345, 544, 601, 522//单元编号,1#节点,2#节点,3#节点

.....

\* \* 定义金属模具 4 三角形单元及其节点号

\* ELEMENT,TYPE=DCAX3,ELSET=TREADMODEL



2794, 646, 643, 642//单元编号,1#节点,2#节点,3#节点

.....

\* \* 定义胎冠基部胶 17 三角形单元及其节点号

\* ELEMENT,TYPE=DCAX3,ELSET=UNDERTREAD

3391, 220, 219, 254//单元编号,1#节点,2#节点,3#节点

.....

\* \* 定义耐磨层 6 四边形单元及其节点号

\* ELEMENT,TYPE=DCAX4,ELSET=ABRASION

2, 1335, 1357, 1356, 1336//单元编号,1#节点号,2#节点,3#节点,4#节点

.....

\* \* 定义过渡胶 10 四边形单元及其节点号

\* ELEMENT,TYPE=DCAX4,ELSET=APEX

2108, 1333, 1332, 1272, 1271//单元编号,1#节点号,2#节点,3#节点,4#节点

.....

\* \* 定义胎体层 11 四边形单元及其节点号

\* ELEMENT,TYPE=DCAX4,ELSET=CARCASS

647, 47, 46, 82, 78//单元编号,1#节点号,2#节点,3#节点,4#节点

.....

\* \* 定义内衬层 12 四边形单元及其节点号

\* ELEMENT,TYPE=DCAX4,ELSET=INNER

813, 78, 82, 62, 61//单元编号,1#节点号,2#节点,3#节点,4#节点

.....

\* \* 定义金属模具 2 四边形单元及其节点号



```

* ELEMENT,TYPE=DCAX4,ELSET=SIDEPLATE
965,      762,      717,      766,      767//单元编号,1#节点号,
2#节点,3#节点,4#节点
.....
* * 定义胎侧 13 四边形单元及其节点号
* ELEMENT,TYPE=DCAX4,ELSET=SIDEWALL
1982,      830,      831,      828,      829//单元编号,1#节点号,
2#节点,3#节点,4#节点
.....
* * 定义垫胶 9 四边形单元及其节点号
* ELEMENT,TYPE=DCAX4,ELSET=SMALLRUBER
3469,      1466,      1472,      1471,      1467//单元编号,1#节点
号,2#节点,3#节点,4#节点
.....
* * 定义胎冠 15 四边形单元及其节点号
* ELEMENT,TYPE=DCAX4,ELSET=TREAD
2263,      83,      84,      91,      92//单元编号,1#节点号,2#
节点,3#节点,4#节点
.....
* * 定义金属模具 4 四边形单元及其节点号
* ELEMENT,TYPE=DCAX4,ELSET=TREADMODEL
2539,      122,      123,      119,      120//单元编号,1#节点号,
2#节点,3#节点,4#节点
.....
* * 定义胎冠基部胶 17 四边形单元及其节点号
* ELEMENT,TYPE=DCAX4,ELSET=UNDERTREAD
3392,      254,      219,      218,      255//单元编号,1#节点号,
2#节点,3#节点,4#节点
.....

```





\* \* 定义钢丝圈 7 四边形单元及其节点号

\* ELEMENT, TYPE=DCAX4, ELSET=BEAD

53, 1540, 1541, 1518, 1519//单元编号, 1#节点号, 2#节点, 3#节点, 4#节点

.....

\* \* 定义带束层四边形单元及其节点号

\* ELEMENT, TYPE=DCAX4, ELSET=BELT

85, 38, 39, 46, 47//单元编号, 1#节点号, 2#节点, 3#节点, 4#节点

.....

\* \* 定义水囊 5 四边形单元及其节点号

\* ELEMENT, TYPE=DCAX4, ELSET=BLADDER

209, 63, 72, 74, 62//单元编号, 1#节点号, 2#节点, 3#节点, 4#节点

.....

\* \* 定义加强层 8 四边形单元及其节点号

\* ELEMENT, TYPE=DCAX4, ELSET=STRENGTH

2235, 1431, 1468, 1469, 1432//单元编号, 1#节点号, 2#节点, 3#节点, 4#节点

.....

\* \* 把轮胎 3 上所有节点创建一个点集, 名称为 tire

\* NSET, NSET=tire

1, 7, 8, 9, .....

\* \* 把水囊 5 上所有节点创建一个点集, 名称为 bladder

\* NSET, NSET=bladder

12, 14, 59, 60, .....

\* \* 把金属模具 2 上所有节点创建一个点集, 名称为 sideplate

\* NSET, NSET=sideplate

2, 3, 4, 5, .....



\* \* 把金属模具 4 上所有节点创建一个点集, 名称为 treadmodel

\* NSET, NSET=treadmodel

30, 108, 109, \*\* 110, .....

\* \* 把金属模具 2、金属模具 4 与蒸汽接触的外表面上所有节点创建一个点集, 名称为 BCSTEEL

\* NSET, NSET=BCSTEEL

2, 30, 137, 138, .....

\* \* 把水囊 5 与过热水接触的内表面上所有节点创建一个点集, 名称为 BCBLADDER

\* NSET, NSET=BCBLADDER

12, 59, 67, 73, .....

\* \* 把轮胎内外表面单元上创建面, 名称为 Surf-1

\* SURFACE, NAME = Surf-1, TYPE = ELEMENT

887, S2//单元号, 单元面号

.....

\* \* 定义耐磨层 6 材料为 MAT2

\* Solid Section, elset=ABRASION, material=MAT2

\* \* 定义钢丝圈 7 材料为 BEAD

\* Solid Section, elset=BEAD, material=BEAD

\* \* 定义带束层 16 材料为 MAT1

\* Solid Section, elset=BELT, material=MAT1

\* \* 定义水囊 5 材料为 BLADDER

\* Solid Section, elset=BLADDER, material=BLADDER

\* \* 定义胎体层 11 材料为 MAT3

\* Solid Section, elset=CARCASS, material=MAT3

\* \* 定义内衬层 12 材料为 MAT4

\* Solid Section, elset=INNER, material=MAT4

\* \* 定义金属模具 2 材料为 STEEL

\* Solid Section, elset=SIDEPLATE, material=STEEL



```
* * 定义胎侧 13 材料为 MAT5
* Solid Section, elset=SIDEWALL, material=MAT5
* * 定义过渡胶 10 材料为 MAT6
* Solid Section, elset=APEX, material=MAT6
* * 定义加强层 8 材料为 MAT7
* Solid Section, elset=STRENGTH, material=MAT7
* * 定义胎冠 15 材料为 MAT8
* Solid Section, elset=TREAD, material=MAT8
* * 定义金属模具 4 材料为 STEEL
* Solid Section, elset=TREADMODEL, material=STEEL
* * 定义胎冠基部胶 17 材料为 MAT2
* Solid Section, elset=UNDERTREAD, material=MAT2
* * 定义肩部垫胶 14 材料为 MAT2
* Solid Section, elset=SMALLRUBER, material=MAT2
* * 创建过热水温度变化历程
* Amplitude, name=AMP-N
0. , 1. , 300. , 0.9444, 3120. , 0.9444
* * 创建水蒸气温度变化历程
* Amplitude, name=AMP-W
0. , 0.7947, 360. , 0.7947, 840. , 1. , 3120. , 1.
* * 定义材料 BEAD 的热物性参数
* Material, name=BEAD
* Conductivity
20. ,
* Density
7000. ,
* Specific Heat
600. ,
* * 定义材料 BELT 的热物性参数
```



\* Material, name=BELT

\* Conductivity

20. ,

\* Density

7000. ,

\* Specific Heat

600. ,

\* \* 定义材料 BLADDER 的热物性参数

\* Material, name=BLADDER

\* Conductivity

0.25 ,

\* Density

1100. ,

\* Specific Heat

1250. ,

\* \* 定义材料 STEEL 的热物性参数

\* Material, name=STEEL

\* Conductivity

50. ,

\* Density

1850. ,

\* Specific Heat

460. ,

\* \* 定义材料 MAT1 的热物性参数,导热系数和比热容采用用户子程序

\* Material, name=MAT1

\* user material, type=thermal, constants=2

20,600

\* Density

7000 ,



```
* Depvar
    3,
* * 定义材料 MAT2 的热物性参数,导热系数和比热容采用用户子程序
* Material, name=MAT2
* user material, type=thermal, constants=2
20,600
* Density
7000,
* Depvar
    3,
* * 定义材料 MAT3 的热物性参数,导热系数和比热容采用用户子程序
* Material, name=MAT3
* user material, type=thermal, constants=2
20,600
* Density
7000,
* Depvar
    3,
* * 定义材料 MAT4 的热物性参数,导热系数和比热容采用用户子程序
* Material, name=MAT4
* user material, type=thermal, constants=2
20,600
* Density
7000,
* Depvar
    3,
* * 定义材料 MAT5 的热物性参数,导热系数和比热容采用用户子程序
* Material, name=MAT5
* user material, type=thermal, constants=2
```



20,600

\* Density

7000,

\* Depvar

3,

\* \* 定义材料 MAT6 的热物性参数,导热系数和比热容采用用户子程序

\* Material, name=MAT6

\* user material, type=thermal, constants=2

20,600

\* Density

7000,

\* Depvar

3,

\* \* 定义材料 MAT7 的热物性参数,导热系数和比热容采用用户子程序

\* Material, name=MAT7

\* user material, type=thermal, constants=2

20,600

\* Density

7000,

\* Depvar

3,

\* \* 定义材料 MAT8 的热物性参数,导热系数和比热容采用用户子程序

\* Material, name=MAT8

\* user material, type=thermal, constants=2

20,600

\* Density

7000,

\* Depvar

3,



```
* * 定温度单位输出形式为℃
* Physical Constants, absolute zero=-273.15
* * 定义轮胎 3 的初始温度
* Initial Conditions, type=TEMPERATURE
TIRE, 30.
* * 定义金属模具 4 的初始温度
* Initial Conditions, type=TEMPERATURE
TREADMODEL, 120.
* * 定义金属模具 2 的初始温度
* Initial Conditions, type=TEMPERATURE
SIDEPLATE, 120.
* * 定义水囊 5 的初始温度
* Initial Conditions, type=TEMPERATURE
BLADDER, 100.
* * 定义升温硫化的分析步
* Step, name=Step-1, inc=10000
* * 定义基本分析参数
* Heat Transfer, end=PERIOD, deltmx=10.
0.01, 3120., 0.01, 4.,
* * 定义水囊内表面的温升历程
* Boundary, amplitude=AMP-N
BCBLADDER, 11, 11, 180.
* * 定义金属模具外表面的温升历程
* Boundary, amplitude=AMP-W
BCSTEEL, 11, 11, 151.
* * 重启分析设置
* Restart, write, frequency=0
* * 场输出变量定义
* Output, field, variable=PRESELECT
```



```

* Element Output, directions=YES
SDV
* End Step
* * 定义轮胎在空气中后硫化分析步
* Step, name=Step-2, inc=10000
* * 定义基本分析参数
* Heat Transfer, end=PERIOD, deltmx=10.
0.01, 3000., 0.01, 4.,
* * 边界条件重新设置
* Boundary, op=NEW
* * 采用模型钝化技术去除水囊和金属模具
* MODEL CHANGE, TYPE=ELEMENT, REMOVE
BLADDER
SIDEPLATE
TREADMODEL
* * 定义轮胎内外表面与 25℃ 的空气之间对流换热
* Sfilm
Surf-1, F, 25., 9.25
Surf-2, F, 25., 7.17
Surf-3, F, 25., 10.71
Surf-4, F, 25., 9.01
Surf-8, F, 25., 4.14
* * 重启分析设置
* Restart, write, frequency=0
* * 场输出变量定义
* Output, field, variable=PRESELECT
* Element Output, directions=YES
SDV
* End Step

```





## 附录 2

# 用户子程序 UMATHT 代码

```
c
c
      subroutine umatht(u,dudt,dudg,flux,dfdt,dfdg,statev,temp,
$      dtemp,dtemdx,time,dtime,predf,dpred,cmname,ntgrd,nstatv,
$      props,nprops,coords,pnewdt,noel,npt,layer,kspt,kstep,kinc)
c
      include 'aba_param.inc'
c
      character * 80 cmname
c
      dimension dudg(ntgrd),flux(ntgrd),dfdt(ntgrd),
$      dfdg(ntgrd,ntgrd),statev(nstatv),dtemdx(ntgrd),time(2),
$      predef(1),dpred(1),props(nprops),coords(3)
c
c
      IF (CMNAME(1:8) .EQ. 'MAT1') THEN
      CALL UMATHT_MAT1(u,dudt,dudg,flux,dfdt,dfdg,statev,temp,
$      dtemp,dtemdx,time,dtime,predf,dpred,cmname,ntgrd,nstatv,
$      props,nprops,coords,pnewdt,noel,npt,layer,kspt,kstep,kinc)
      ELSE IF (CMNAME(1:8) .EQ. 'MAT2') THEN
```



```
CALL UMATHT_MAT2(u,dudt,dudg,flux,dfdt,dfdg,statev,temp,
$   dtemp,dtemdx,time,dtime,predef,dpred,cmname,ntgrd,nstatv,
$   props,nprops,coords,pnewdt,noel,npt,layer,kspt,kstep,kinc)
ELSE IF(CMNAME(1:8) .EQ. 'MAT3') THEN
CALL UMATHT_MAT3(u,dudt,dudg,flux,dfdt,dfdg,statev,temp,
$   dtemp,dtemdx,time,dtime,predef,dpred,cmname,ntgrd,nstatv,
$   props,nprops,coords,pnewdt,noel,npt,layer,kspt,kstep,kinc)
ELSE IF(CMNAME(1:8) .EQ. 'MAT4') THEN
CALL UMATHT_MAT4(u,dudt,dudg,flux,dfdt,dfdg,statev,temp,
$   dtemp,dtemdx,time,dtime,predef,dpred,cmname,ntgrd,nstatv,
$   props,nprops,coords,pnewdt,noel,npt,layer,kspt,kstep,kinc)
ELSE IF(CMNAME(1:8) .EQ. 'MAT5') THEN
CALL UMATHT_MAT5(u,dudt,dudg,flux,dfdt,dfdg,statev,temp,
$   dtemp,dtemdx,time,dtime,predef,dpred,cmname,ntgrd,nstatv,
$   props,nprops,coords,pnewdt,noel,npt,layer,kspt,kstep,kinc)
ELSE IF(CMNAME(1:8) .EQ. 'MAT6') THEN
CALL UMATHT_MAT6(u,dudt,dudg,flux,dfdt,dfdg,statev,temp,
$   dtemp,dtemdx,time,dtime,predef,dpred,cmname,ntgrd,nstatv,
$   props,nprops,coords,pnewdt,noel,npt,layer,kspt,kstep,kinc)
ELSE IF(CMNAME(1:8) .EQ. 'MAT7') THEN
CALL UMATHT_MAT7(u,dudt,dudg,flux,dfdt,dfdg,statev,temp,
$   dtemp,dtemdx,time,dtime,predef,dpred,cmname,ntgrd,nstatv,
$   props,nprops,coords,pnewdt,noel,npt,layer,kspt,kstep,kinc)
ELSE IF(CMNAME(1:8) .EQ. 'MAT8') THEN
CALL UMATHT_MAT8(u,dudt,dudg,flux,dfdt,dfdg,statev,temp,
$   dtemp,dtemdx,time,dtime,predef,dpred,cmname,ntgrd,nstatv,
$   props,nprops,coords,pnewdt,noel,npt,layer,kspt,kstep,kinc)
END IF
```



```

return
end
c
subroutine UMATHT_MAT1(u, dudt, dudg, flux, dfdt, dfdg, statev,
temp,
$    dtemp, dtemdx, time, dtime, predef, dpred, cmname, ntgrd, nstatv,
$    props, nprops, coords, pnewdt, noel, npt, layer, kspt, kstep, kinc)
c
include 'aba_param.inc'
c
character * 80 cmname
c
dimension dudg(ntgrd), flux(ntgrd), dfdt(ntgrd),
$    dfdg(ntgrd, ntgrd), statev(nstatv), dtemdx(ntgrd), time(2),
$    predef(1), dpred(1), props(nprops), coords(3)
c
c
real ka, ia, da, fa, t, dy, mka, mia, mda, mfa, my
cond = props(1)
specht = props(2)
c
c    induction
dy =  * exp( / ( + TEMP + DTEMP))
STATEV(3) = STATEV(3) + dy * DTIME
c    curing process
if (STATEV(3) <= 1) then
STATEV(1) = 
fa = 0

```



```

c   if a<0.2 we use kamal model else we use MKS model
elseif(STATEV(1)<0.2)then
    ka=[ ] * EXP([ ]/(273.15+TEMP+DTEMP))
    ia=(STATEV(1)) * [ ]
    da=ia * (1-STATEV(1)) * [ ]
    STATEV(1)=STATEV(1)+ka * da * DTIME
    fa=[ ] * ka * da
    STATEV(2)=ka * da
else
    mka = [ ] * EXP([ ]/(273.15 + TEMP +
DTEMP))
    mia=STATEV(1)/(1-STATEV(1))
    mda=mia * [ ]
    mfa=(1-STATEV(1)) * [ ]
    my=[ ] * mda * mfa/mka
    STATEV(1)=STATEV(1)+my * DTIME
    STATEV(2)=my
    fa=[ ] * my
end if

c
c   input specific heat
dudt = specht
du = dudt * dtemp
u = u+du

c
c   input flux = -[k] * {dtemdx}

```



```
do i=1, ntgrd
    flux(i) = -cond * dtemdx(i)
end do

c
c          input isotropic conductivity
c
do i=1, ntgrd
    dfdg(i,i) = -cond
end do

c
return
end

c
c
c      subroutine UMATHT_MAT2(u, dudt, dudg, flux, dfdt, dfdg, statev,
temp,
$      dtemp, dtemdx, time, dtime, predef, dpred, cmname, ntgrd, nstatv,
$      props, nprops, coords, pnnewdt, noel, npt, layer, kspt, kstep, kinc)
c
include 'aba_param.inc'
c
character * 80 cmname
c
dimension dudg(ntgrd), flux(ntgrd), dfdt(ntgrd),
$      dfdg(ntgrd, ntgrd), statev(nstatv), dtemdx(ntgrd), time(2),
$      predef(1), dpred(1), props(nprops), coords(3)
c
c
c      real ka, ia, da, fa, t, dy, mka, mia, mda, mfa, my
```



cond = props(1)

specht = props(2)

c

c induction

dy =  \* exp( / (273.15 + TEMP + DTEMP))

STATEV(3) = STATEV(3) + dy \* DTIME

c curing process

if (STATEV(3) <= 1) then

STATEV(1) =

fa = 0

c if a < 0.2 we use kamal model else we use MKS model

elseif (STATEV(1) < 0.2) then

ka =  \* EXP( / (273.15 + TEMP + DTEMP))

ia = (STATEV(1)) \* \*

da = ia \* (1 - STATEV(1)) \* \*

STATEV(1) = STATEV(1) + ka \* da \* DTIME

fa =  \* ka \* da

STATEV(2) = ka \* da

else

mka =  \* EXP( / (273.15 + TEMP +

DTEMP))

mia = STATEV(1) / (1 - STATEV(1))

mda = mia \* \*

mfa = (1 - STATEV(1)) \* \* 2

my =  \* mda \* mfa / mka

STATEV(1) = STATEV(1) + my \* DTIME



```

STATEV(2)=my
fa= * my
end if

c
c                                     input specific heat
dudt = specht
du = dudt * dtemp
u = u+du

c
c                                     input flux = -[k] * {dtemdx}
do i=1, ntgrd
    flux(i) = -cond * dtemdx(i)
end do

c
c                                     input isotropic conductivity
c
do i=1, ntgrd
    dfdg(i,i) = -cond
end do

c
return
end

c
c
subroutine UMATHT_MAT3(u,dudt,dudg,flux,dfdt,dfdg,statev,
temp,
$      dtemp,dtemdx,time,dtime,predf,dpred,cmname,ntgrd,
nstatv,

```



```
$      props,nprops,coords,pnewdt,noel,npt,layer,kspt,kstep,kinc)
```

c

```
include 'aba_param.inc' **
```

c

```
character * 80 cmname
```

c

```
dimension dudg(ntgrd),flux(ntgrd),dfdt(ntgrd),
```

```
$      dfdg(ntgrd,ntgrd),statev(nstatv),dtemdx(ntgrd),time(2),
```

```
$      predef(1),dpred(1),props(nprops),coords(3)
```

c

c

```
real ka,ia,da,fa,t,dy, mka,mia,mda,mfa,my
```

```
cond = props(1)
```

```
specht = props(2)
```

c

c induction

```
dy=[ ] * exp([ ]/(273.15+TEMP+DTEMP))
```

```
STATEV(3)=STATEV(3)+dy * DTIME
```

c

curing process

```
if (STATEV(3) <= 1) then
```

```
STATEV(1)=[ ]
```

```
fa=0
```

c

if a<0.2 we use kamal model else we use MKS model

```
elseif (STATEV(1) < 0.2) then
```

```
ka=[ ] * EXP([ ]/(273.15+TEMP+DTEMP))
```

```
ia=(STATEV(1)) * * [ ]
```

```
da=ia * (1-STATEV(1)) * * [ ]
```







```

do i=1, ntgrd
  dfdg(i,i) = -cond
end do
c
return
end
c
c
subroutine UMATHT_MAT4(u, dudt, dudg, flux, dfdt, dfdg, statev,
temp,
$   dtemp, dtemdx, time, dtime, predef, dpred, cmname, ntgrd, nstatv,
$   props, nprops, coords, pnewdt, noel, npt, layer, kspt, kstep, kinc)
c
include 'aba_param.inc'
c
character * 80 cmname
c
dimension dudg(ntgrd), flux(ntgrd), dfdt(ntgrd),
$   dfdg(ntgrd, ntgrd), statev(nstatv), dtemdx(ntgrd), time(2),
$   predef(1), dpred(1), props(nprops), coords(3)
c
c
real ka, ia, da, fa, t, dy, mka, mia, mda, mfa, my
cond = props(1)
specht = props(2)
c
c   induction
dy=  * exp((273.15+TEMP+DTEMP))

```



STATEV(3)=STATEV(3)+dy \* DTIME

c curing process

if (STATEV(3) ≤ 1) then

STATEV(1) =

fa = 0

c if a < 0.2 we use kamal model else we use MKS model

elseif (STATEV(1) < 0.2) then

ka =  \* EXP( / (273.15 + TEMP + DTEMP))

ia = (STATEV(1)) \*

da = ia \* (1 - STATEV(1)) \*

STATEV(1) = STATEV(1) + ka \* da \* DTIME

fa =  \* ka \* da

STATEV(2) = ka \* da

else

mka =  \* EXP( / (273.15 + TEMP + DTEMP))

mia = STATEV(1) / (1 - STATEV(1))

mda = mia \*

mfa = (1 - STATEV(1)) \* 2

my =  \* mda \* mfa / mka

STATEV(1) = STATEV(1) + my \* DTIME

STATEV(2) = my

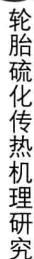
fa =  \* my

end if

c

c

input specific heat





```

$      dfdg(ntgrd,ntgrd),statev(nstatv),dtemdx(ntgrd),time(2),
$      predef(1),dpred(1),props(nprops),coords(3)
c
c
      real ka,ia,da,fa,t,dy,mka,mia,mda,mfa,my
      cond = props(1)
      specht = props(2)
c
c      induction
      dy=[ ] * exp([ ]/(273.15+TEMP+DTEMP))
      STATEV(3)=STATEV(3)+dy * DTIME
c      curing process
      if(STATEV(3)<=1)then
          STATEV(1)=[ ]
          fa=0
c      if a<0.2 we use kamal model else we use MKS model
      elseif(STATEV(1)<0.2)then
          ka=[ ] * EXP([ ]/(273.15+TEMP+DTEMP))
          ia=(STATEV(1)) * * [ ]
          da=ia * (1-STATEV(1)) * * [ ]
          STATEV(1)=STATEV(1)+ka * da * DTIME
          fa=[ ] * ka * da
          STATEV(2)=ka * da
          else
              mka = [ ] * EXP([ ]/(273.15+TEMP+
DTEMP))
              mia=STATEV(1)/(1-STATEV(1))

```



```

mda=mia * * 
mfa=(1-STATEV(1)) * * 2
my= * mda * mfa/mka
STATEV(1)=STATEV(1)+my * DTIME
STATEV(2)=my
fa= * my

```

end if

c

c

input specific heat

dudt = specht

du = dudt \* dtemp

u = u+du

c

c

input flux = -[k] \* {dtemdx}

do i=1, ntgrd

flux(i) = -cond \* dtemdx(i)

end do

c

c

input isotropic conductivity

c

do i=1, ntgrd

dfdg(i,i) = -cond

end do

c

return

end

c

c



```

subroutine UMATHT_MAT6(u,du,dg,flux,dfdt,dfdg,statev,
temp,
$    dtemp,dtemdx,time,dtime,predf,dpred,cmname,ntgrd,nstatv,
$    props,nprops,coords,pnewdt,noel,npt,layer,kspt,kstep,kinc)
c
include 'aba_param.inc'
c
character * 80 cmname
c
dimension dudg(ntgrd),flux(ntgrd),dfdt(ntgrd),
$    dfdg(ntgrd,ntgrd),statev(nstatv),dtemdx(ntgrd),time(2),
$    predef(1),dpred(1),props(nprops),coords(3)
c
c
real ka,ia,da,fa,t,dy, mka,mia,mda,mfa,my
cond = props(1)
specht = props(2)
c
c    induction
dy=[ ] * exp([ ]/(273.15+TEMP+DTEMP))
STATEV(3)=STATEV(3)+dy * DTIME
c    curing process
if(STATEV(3)<=1)then
STATEV(1)=[ ]
fa=0
c    if a<0.2 we use kamal model else we use MKS model
elseif(STATEV(1)<0.2)then
ka=[ ] * EXP([ ]/(273.15+TEMP+DTEMP))

```



$$ia = (STATEV(1)) * * \boxed{\phantom{000}}$$

$$da = ia * (1 - STATEV(1)) * * \boxed{\phantom{000}}$$

$$STATEV(1) = STATEV(1) + ka * da * DTIME$$

$$fa = \boxed{\phantom{000}} * ka * da$$

$$STATEV(2) = ka * da$$

else

$$mka = \boxed{\phantom{000}} * \text{EXP}(\boxed{\phantom{000}} / (273.15 + \text{TEMP} +$$

DTEMP))

$$mia = STATEV(1) / (1 - STATEV(1))$$

$$mda = mia * * \boxed{\phantom{000}}$$

$$mfa = (1 - STATEV(1)) * * 2$$

$$my = \boxed{\phantom{000}} * mda * mfa / mka$$

$$STATEV(1) = STATEV(1) + my * DTIME$$

$$STATEV(2) = my$$

$$fa = \boxed{\phantom{000}} * my$$

end if

c

c

input specific heat

$$dudt = \text{specht}$$

$$du = dudt * dtemp$$

$$u = u + du$$

c

c

$$\text{input flux} = -[k] * \{dtemdx\}$$

$$\text{do } i=1, \text{ntgrd}$$





```
        flux(i) = -cond * dtemdx(i)
    end do

c
c                                     input isotropic conductivity
c
    do i=1, ntgrd
        dfdg(i,i) = -cond
    end do

c
    return
end

c
c
    subroutine UMATHT_MAT7 (u, dudt, dudg, flux, dfdt, dfdg, statev,
temp,
    $    dtemp, dtemdx, time, dtime, predef, dpred, cmname, ntgrd, nstatv,
    $    props, nprops, coords, pnewdt, noel, npt, layer, kspt, kstep, kinc)

c
    include 'aba_param.inc'

c
    character * 80 cmname

c
    dimension dudg(ntgrd), flux(ntgrd), dfdt(ntgrd),
    $    dfdg(ntgrd, ntgrd), statev(nstatv), dtemdx(ntgrd), time(2),
    $    predef(1), dpred(1), props(nprops), coords(3)

c
c
    real ka, ia, da, fa, t, dy, mka, mia, mda, mfa, my
    cond = props(1)
```



```

specht = props(2)

c
c   induction
dy=[ ] * exp([ ]/(273.15+TEMP+DTEMP))
STATEV(3)=STATEV(3)+dy * DTIME

c   curing process
    if (STATEV(3)<=1) then
        STATEV(1)=[ ]
        fa=0
c       if a<0.2 we use kamal model else we use MKS model
elseif (STATEV(1)<0.2) then
    ka=[ ] * EXP([ ]/(273.15+TEMP+DTEMP))
    ia=(STATEV(1)) * * [ ]
    da=ia * (1-STATEV(1)) * * [ ]
    STATEV(1)=STATEV(1)+ka * da * DTIME
    fa=[ ] * ka * da
    STATEV(2)=ka * da
else
    mka=[ ] * EXP([ ]/(273.15+TEMP+
DTEMP))
    mia=STATEV(1)/(1-STATEV(1))
    mda=mia * * [ ]
    mfa=(1-STATEV(1)) * * 2
    my=[ ] * mda * mfa/mka
    STATEV(1)=STATEV(1)+my * DTIME
    STATEV(2)=my

```



```
fa=  * my
end if

c
c                                     input specific heat
dudt = specht
du = dudt * dtemp
u = u+du
c
c                                     input flux = -[k] * {dtemdx}
do i=1, ntgrd
    flux(i) = -cond * dtemdx(i)
end do
c
c                                     input isotropic conductivity
c
do i=1, ntgrd
    dfdg(i,i) = -cond
end do
c
return
end

c
subroutine UMATHT_MAT8(u, dudt, dudg, flux, dfdt, dfdg, statev,
temp,
$    dtemp, dtemdx, time, dtime, predef, dpred, cmname, ntgrd, nstatv,
$    props, nprops, coords, pnnewdt, noel, npt, layer, kspt, kstep, kinc)
c
include 'aba_param.inc'
```



```

c
character * 80 cmname

c
dimension dudg(ntgrd),flux(ntgrd),dfdt(ntgrd),
$   dfdg(ntgrd,ntgrd),statev(nstatv),dtemdx(ntgrd),time(2),
$   predef(1),dpred(1),props(nprops),coords(3)

c

c
real ka,ia,da,fa,t,dy, mka,mia,mda,mfa,my
cond = props(1)
specht = props(2)

c

c   induction
dy=[ ] * exp([ ]/(273.15+TEMP+DTEMP))
STATEV(3)=STATEV(3)+dy * DTIME

c   curing process
if(STATEV(3)<=1)then
    STATEV(1)=[ ]
    fa=0

c   if a<0.2 we use kamal model else we use MKS model
elseif(STATEV(1)<0.2)then
    ka=[ ] * EXP([ ]/(273.15+TEMP+DTEMP))
    ia=(STATEV(1)) * * [ ]
    da=ia * (1-STATEV(1)) * * [ ]
    STATEV(1)=STATEV(1)+ka * da * DTIME
    fa=[ ] * ka * da
    STATEV(2)=ka * da

```



```

else
    mka =  * EXP (  / ( 273. 15 + TEMP +
DTEMP ) )
    mia = STATEV(1) / ( 1 - STATEV(1) )
    mda = mia * 
    mfa = ( 1 - STATEV(1) ) * * 2
    my =  * mda * mfa / mka
    STATEV(1) = STATEV(1) + my * DTIME
    STATEV(2) = my
    fa =  * my
end if

c
c                                     input specific heat
dudt = specht
du = dudt * dtemp
u = u + du

c
c                                     input flux = -[k] * {dtemdx}
do i=1, ntgrd
    flux(i) = -cond * dtemdx(i)
end do

c
c                                     input isotropic conductivity
c
do i=1, ntgrd
    dfdg(i,i) = -cond
end do

c

```



```

return
end
c
c
subroutine usdfld(field, statev, pnewdt, direct, t, celent, time, dtime,
1 cmname, orname, nfield, nstatv, noel, npt, layer, kspt, kstep, kinc,
2 ndi, nshr, coord, jmac, jmtyp, matlayo, laccflg)
c
include 'aba_param.inc'
c
character * 80 cmname, orname
character * 3 flgray(15)
dimension field(nfield), statev(nstatv), direct(3,3), t(3,3), time(2),
* coord(*), jmac(*), jmtyp(*)
dimension array(15), jarray(15)
c
c Get temperatures from previous increment
call getvrm('TEMP', array, jarray, flgray, jrcd,
$ jmac, jmtyp, matlayo, laccflg)
temp = array(1)
field(1) = 10
return
end

```



## 附录 3

# 轮胎硫化专用软件代码

1) 界面一

```
Public infilename As String
```

```
' 判断是否调用子程序
```

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
    infilename = Text1.Text
```

```
    If Text1.Text <> "" Then
```

```
        If Option1.Value = True Then
```

```
            Form3.Show
```

```
        Else
```

```
            Form2.Show
```

```
        End If
```

```
        Unload Me
```

```
    Else
```

```
        MsgBox "请导入文件"
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

```
' 退出
```

```
Private Sub Command2_Click()
```

```
    End
```

```
End Sub
```



' 浏览 INP 网格文件

```
Private Sub Command5_Click()
```

```
    CommonDialog1.ShowOpen
```

```
    Text1.Text = CommonDialog1.filename
```

```
End Sub
```

2) 界面二

```
Public forfilename As String
```

' 浏览用户材料子程序

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
    CommonDialog1.ShowOpen
```

```
    Text1.Text = CommonDialog1.filename
```

```
End Sub
```

' 确定

```
Private Sub Command2_Click()
```

```
    forfilename = Text1.Text
```

```
    If Text1.Text <> "" Then
```

```
        Form2.Show
```

```
    Else
```

```
        MsgBox "请选择子程序文件"
```

```
    End If
```

```
    Unload Me
```

```
End Sub
```

3) 界面三

```
Dim NO1 As Integer
```

```
Dim arr1(1000) As String
```

```
Dim a As String
```

```
Dim z As Integer
```

```
Dim t As Integer
```

```
Dim q As Integer
```





```
Dim abqusinpfilename As String
Dim formloptionlvalue As String
Dim getpathfromfilename As String
Dim inputfilename As String
Dim outputfilename As String
Private Declare Function ShellExecute Lib "shell32.dll" Alias "ShellExecuteA"
    (ByVal hwnd As Long, ByVal lpOperation As String, ByVal lpFile As String,
    ByVal lpParameters As String, ByVal lpDirectory As String, ByVal nShowCmd
    As Long) As Long
Private Const SW_SHOWNORMAL = 1
' 菜单栏保存
Private Sub BC_Click()
    Call Command12_Click
End Sub
' 菜单栏查看 ODB 文件
Private Sub CHKJG_Click()
    Call Command15_Click
End Sub
' 菜单栏材料库添加
Private Sub CLKTJ_Click()
    Form4.Show
End Sub
' 打开帮助文件
Private Sub GY_Click()
    Dim result
    result = ShellExecute(0, vbNullString, App.Path & "\轮胎硫化数值模拟专用
    软件说明书.pdf", vbNullString, vbNullString, SW_SHOWNORMAL)
    If result <= 32 Then
        MsgBox "打开失败!", vbOKOnly + vbCritical, "错误:", 0
```



```
End If
End Sub
' 菜单栏提交计算
Private Sub TJJS_Click()
    Call Command13_Click
End Sub
' 菜单栏识别温度点集
Private Sub WDDJ_Click()
    Call Command7_Click
End Sub
' 菜单栏退出
Private Sub TCH_Click()
    End
End Sub
' 菜单栏生成模型文件
Private Sub SHCHMXWJ_Click()
    Call Command12_Click
End Sub
' 菜单栏导入 EXCEL 文件
Private Sub excel_Click()
    Call Command8_Click
End Sub
' 菜单栏查看 EXCEL 文件
Private Sub excel 文件_Click()
    Call Command1_Click
End Sub
' 主界面三加载
Private Sub Form_Load()
    Timer1.Interval = 150
```



```
Label14.Caption = "欢迎使用轮胎硫化数值模拟专用软件"
Label14.AutoSize = True
Label14.Left = 12000
Label14.Top = 0
MSFlexGrid1(z).TextMatrix(0, 0) = "序号"
MSFlexGrid1(z).TextMatrix(0, 1) = "时间/s"
MSFlexGrid1(z).TextMatrix(0, 2) = "温度/℃"
MSFlexGrid1(z).TextMatrix(1, 0) = "1"
MSFlexGrid1(z).TextMatrix(2, 0) = "2"
MSFlexGrid1(z).TextMatrix(3, 0) = "3"
MSFlexGrid1(z).TextMatrix(4, 0) = "4"
MSFlexGrid1(z).TextMatrix(5, 0) = "5"
MSFlexGrid1(z).TextMatrix(6, 0) = "6"
MSFlexGrid1(z).TextMatrix(7, 0) = "7"
MSFlexGrid1(z).TextMatrix(8, 0) = "8"
MSFlexGrid1(z).TextMatrix(9, 0) = "9"
MSFlexGrid1(z).TextMatrix(10, 0) = "10"
abqusinfilename = Form1.inpfilename
formoption1value = Form1.Option1.Value
'识别导入的 INP 网格文件路径
getpathfromfilename = Mid $ ( abqusinfilename , InStrRev
(abqusinfilename , "/" ) + 1)
For i = 1 To Len(abqusinfilename )
    If Mid(abqusinfilename , i, 1) = "/" Then
        inputfilename = Left(abqusinfilename , i)
    End If
Next
Call CaiLiaoDanYuan_Click
Call BianJieWenDuDanYuan_Click
```



```
Call ChuShiWenDuDanYuan_Click
'提取材料库
Dim CLfilename As String
CLfilename = App.Path & "\材料库\材料库文件名称.txt"
Open CLfilename For Input As #1
Dim temp As String
Dim CL As Integer
CL = 0
Combo3.AddItem "材料库"
Do While Not EOF(1)
    Line Input #1, temp
    If temp <> "" Then
        Combo3.AddItem temp
    End If
    CL = CL + 1
Loop
Close #1
End Sub
' 屏幕上方“欢迎…”滚动
Private Sub Timer1_Timer()
    StatusBar1.Panels(2) = Date & " " & Time
    Dim temp
    temp = (Me.ScaleWidth - Label14.Width) / 100
    Label14.Left = Label14.Left - temp
    If Label14.Left < -Me.ScaleWidth + 8500 Then
        Label14.Left = Label14.Width + 7500
    End If
End Sub
' 选择材料库
```



```
Private Sub Combo3_Click()  
    For j = 1 To List1.ListCount  
        Combo1(j).Clear  
    Next  
    If Combo3.Text <> "材料库" Then  
        Dim txtfilename As String  
        txtfilename = App.Path & "\材料库\" & Combo3.Text  
        Open txtfilename For Input As #1  
        Dim pos As Integer  
        Dim target As String  
        Dim temp As String  
        Do While Not EOF(1)  
            Line Input #1, temp  
            target = "name="  
            pos = InStr(1, temp, target)  
            If pos > 0 Then  
                ' 找到了匹配字符串  
                For i = 1 To List1.ListCount  
                    Combo1(i).AddItem Mid(temp, pos + 5)  
                    Combo1(i).Text = Combo1(i).List(0)  
                Next  
            End If  
        Loop  
        Close #1  
    Else  
        For j = 1 To List1.ListCount  
            Combo1(j).Text = "请选择材料库"  
        Next  
    End If  
End Sub
```



End Sub

' 提取部件单元

Private Sub CaiLiaoDanYuan\_Click()

Label1(0).Visible = True

Dim filename As String

On Error GoTo err\_1

If List1.ListCount = 0 Then

filename = abqusinpfilename

Open filename For Input As #1

Dim pos As Integer

Dim target As String

Dim temp As String

Do While Not EOF(1)

Line Input #1, temp

target = "ELSET="

pos = InStr(1, temp, target)

If pos > 0 Then

' 找到了匹配字符串

List1.AddItem Mid(temp, pos + 6)

End If

Loop

Close #1

' 删除重复者

Dim i, j As Integer

With List1

For i = 0 To .ListCount - 1

For j = .ListCount - 1 To i + 1 Step -1

If .List(j) = .List(i) Then

.RemoveItem j



```
End If
Next j
Next i
End With
' 显示提取的单元
Dim k1 As Integer
For k1 = 1 To List1.ListCount
    Load Me.Label1(k1)
    Label1(k1).Top = Label1(k1 - 1).Top + Label1(0).
Height + 5
    Label1(k1).Left = 500
    Label1(k1).Caption = List1.List(k1 - 1)
    Label1(k1).Visible = True
Next
' 加载材料属性框
Dim k2 As Integer
For k2 = 1 To List1.ListCount
    Load Me.Combol(k2)
    Combol(k2).Top = Combol(k2 - 1).Top + Combol(0).
Height
    Combol(k2).Visible = True
Next
End If
err_1:
End Sub
' 检索初始温度点集
Private Sub ChuShiWenDuDanYuan_Click()
    Label2(0).Visible = True
    Label5.Visible = True
```



```
Dim pos As Integer
Dim target As String
Dim temp As String
On Error GoTo err_1
If List2.ListCount = 0 Then
    filename = abqusinfilename
    Open filename For Input As #1
    Do While Not EOF(1)
        Line Input #1, temp
        target = "NSET="
        pos = InStr(1, temp, target)
        If pos > 0 Then
            ' 找到了匹配字符串
            If Mid(temp, pos + 5, 2) <> "BC" Then
                List2.AddItem UCase(Mid(temp, pos + 5))
            End If
        End If
    End If
    Loop
    Close #1
    ' 删除重复者
    Dim i, j As Integer
    With List2
        For i = 0 To .ListCount - 1
            For j = .ListCount - 1 To i + 1 Step -1
                If .List(j) = .List(i) Then
                    .RemoveItem j
                End If
            Next j
        Next i
    End With
Next i
```





```
End With
' 提取
Dim k3 As Integer
For k3 = 1 To List2.ListCount
Load Me.Label2(k3)
Label2(k3).Top = Label2(k3 - 1).Top + Label2(0).Height
Label2(k3).Left = 600
Label2(k3).Caption = List2.List(k3 - 1)
Label2(k3).Visible = True
Next
' 温度
Dim k4 As Integer
For k4 = 1 To List2.ListCount
Load Me.Text2(k4)
Text2(k4).Top = Text2(k4 - 1).Top + Text2(0).Height
Text2(k4).Visible = True
Next
End If

err_1:
End Sub

' 检索边界温度点集
Private Sub BianJieWenDuDanYuan_Click()
Dim pos As Integer
Dim target As String
Dim temp As String
On Error GoTo err_1
filename = abqusinfilename
Open filename For Input As #1
Do While Not EOF(1)
```



```
Line Input #1, temp
target = "NSET=BC"
pos = InStr(1, temp, target)
If pos > 0 Then
    ' 找到了匹配字符串
    List3.AddItem Mid(temp, pos + 5)
End If
Loop
Close #1
' 删除重复者
Dim i, j As Integer
With List3
    For i = 0 To .ListCount - 1
        For j = .ListCount - 1 To i + 1 Step -1
            If .List(j) = .List(i) Then
                .RemoveItem j
            End If
        Next j
    Next i
End With
' 外界温度
Dim k5 As Integer
For k5 = 0 To List3.ListCount - 1
    Combo2.List(k5) = List3.List(k5)
Next
Combo2.Text = Combo2.List(0)
For z = 1 To List3.ListCount - 1
    Load Me.MSFlexGrid1(z)
Next
```



```
For z = 0 To List3.ListCount - 1
    MSFlexGrid1(z).TextMatrix(0, 0) = "序号"
    MSFlexGrid1(z).TextMatrix(0, 1) = "时间/s"
    MSFlexGrid1(z).TextMatrix(0, 2) = "温度/℃"
    MSFlexGrid1(z).TextMatrix(1, 0) = "1"
    MSFlexGrid1(z).TextMatrix(2, 0) = "2"
    MSFlexGrid1(z).TextMatrix(3, 0) = "3"
    MSFlexGrid1(z).TextMatrix(4, 0) = "4"
    MSFlexGrid1(z).TextMatrix(5, 0) = "5"
    MSFlexGrid1(z).TextMatrix(6, 0) = "6"
    MSFlexGrid1(z).TextMatrix(7, 0) = "7"
    MSFlexGrid1(z).TextMatrix(8, 0) = "8"
    MSFlexGrid1(z).TextMatrix(9, 0) = "9"
    MSFlexGrid1(z).TextMatrix(10, 0) = "10"
Next
For i = 1 To List3.ListCount - 1
    MSFlexGrid1(0).Visible = True
    MSFlexGrid1(i).Visible = False
Next
err_1:
End Sub
' 从边界点集下拉框中选择边界点集
Private Sub combo2_click()
    Text3.Visible = False
    For t = 0 To List3.ListCount - 1
        If Combo2.Text = Combo2.List(t) Then
            For i = 0 To List3.ListCount - 1
                MSFlexGrid1(i).Visible = False
            Next
```



```
MSFlexGrid1(t). Visible = True
q = t
End If
Next
End Sub

' 表格输入
Private Sub MSFlexGrid1_Click(Index As Integer)
If MSFlexGrid1(q). Col <> 0 And MSFlexGrid1(q). Row <> 0 Then
Text3. Visible = True
Text3. Left = MSFlexGrid1(q). CellLeft + MSFlexGrid1(q). Left
Text3. Top = MSFlexGrid1(q). CellTop + MSFlexGrid1(q). Top
Text3. Width = MSFlexGrid1(q). CellWidth
Text3. Height = MSFlexGrid1(q). CellHeight
Text3. Text = MSFlexGrid1(q). Text
MSFlexGrid1(q). CellAlignment = 3
Text3. SetFocus
Text3. SelStart = 0
Text3. SelLength = 255
End If
End Sub

' 点击表格输入框
Private Sub text3_KeyPress(KeyAscii As Integer)
On Error Resume Next
If KeyAscii = 13 Then
If MSFlexGrid1(q). Col = 2 And MSFlexGrid1(q). Row =
MSFlexGrid1(q). Rows - 1 Then
MSFlexGrid1(q). Rows = MSFlexGrid1(q). Rows + 1
For i = 2 To MSFlexGrid1(q). Rows - 1
MSFlexGrid1(q). TextMatrix(i, 0) = i
```



```
Next
End If
MSFlexGrid1(q).Text = Text3.Text
If MSFlexGrid1(q).Row <= MSFlexGrid1(q).Rows - 1 Then
    If MSFlexGrid1(q).Col = 1 Then
        MSFlexGrid1(q).Col = 2
        MSFlexGrid1_Click(Index)
    Else
        MSFlexGrid1(q).Col = 1
        MSFlexGrid1(q).Row = MSFlexGrid1(q).Row + 1
        MSFlexGrid1_Click(Index)
    End If
End If
End If
End Sub
' 写入 INP 前处理文件
Private Sub Command12_Click()
    Dim form3text As String
    form3text = Form3.forfilename
    Dim forname As String
    On Error GoTo err_1
    Dim inputfilename_inp As String
    inputfilename_inp = inputfilename & Text9.Text & ".inp"
    If form1option1value = True Then
        forname = Mid$(form3text, InStrRev(form3text, "\") + 1)
        FileCopy form3text, inputfilename & forname
    End If
    Open inputfilename_inp For Output As #1
    ' 在一号文件区打开文件里写入
```



```

a = " * Heading" &. vbCrLf
a = a &. " * INCLUDE, INPUT=" &. getpathfromfilename &. vbCrLf
&. " * NSET, NSET=ZJ" &. _vbCrLf &. Text1.Text &. vbCrLf &. " * ELSET,
ELSET=HH" &. vbCrLf &. Text11.Text &. vbCrLf
' 材料属性写入文件
For i = 1 To List1.ListCount
    a = a &. " * Solid Section, elset=" &. Label1(i) &. ", material=" &.
Combol(i) &. vbCrLf
Next
a = a &. " * * "
' 边界温度
For i = 1 To List3.ListCount
    If i = 1 Then
        a = a &. vbCrLf &. " * Amplitude, name = AMP - N"
&. vbCrLf
        If MSFlexGrid1(i - 1).TextMatrix(1, 1) <> "" Then
            a = a &. MSFlexGrid1(i - 1).TextMatrix(1, 1) &.
", " &. MSFlexGrid1(i - 1).TextMatrix(1, 2)
        End If
    Else
        a = a &. vbCrLf &. " * Amplitude, name = AMP - W"
&. vbCrLf
        If MSFlexGrid1(i - 1).TextMatrix(1, 1) <> "" Then
            a = a &. MSFlexGrid1(i - 1).TextMatrix(1, 1) &.
", " &. MSFlexGrid1(i - 1).TextMatrix(1, 2)
        End If
    End If
    For j = 2 To MSFlexGrid1(i - 1).Row - 1
        If MSFlexGrid1(i - 1).TextMatrix(j, 1) <> "" Then

```



```
a = a & ", " & MSFlexGrid1(i - 1).TextMatrix  
(j, 1) & ", " & _  
MSFlexGrid1(i - 1).TextMatrix(j, 2)  
End If  
Next j  
Next i  
a = a & vbCrLf & " * * "  
' 材料属性附材料  
Dim txtfilename As String  
If form1option1value = True Then  
    txtfilename = App.Path & "\材料属性 2. txt"  
Else  
    txtfilename = App.Path & "\材料属性. txt"  
End If  
Open txtfilename For Input As #2  
Do While Not EOF(2)  
    Line Input #2, temp  
' 找到了匹配字符串  
    While (temp <> "")  
        Line Input #2, temp  
        a = a & vbCrLf & temp  
    Wend  
Loop  
Close #2  
' 提取初始温度点集  
a = a & " * * " & vbCrLf & " * * PHYSICAL CONSTANTS"  
& vbCrLf & " * * " & vbCrLf & " * * Physical Constants, absolute zero=  
-273. 15" & vbCrLf & " * * " & vbCrLf & _  
" * * PREDEFINED FIELDS" & vbCrLf & " * * "
```



```

For i = 1 To List2.ListCount
    a = a & vbCrLf & " * * Name: Field - " & i &
    " Type: Temperature" & vbCrLf & _ " * Initial Conditions, type =
    TEMPERATURE" & vbCrLf & Label2(i) & ", " & " " & _
    Text2(i).Text & ". "

```

Next

```

a = a & vbCrLf & " * * _____ " & vbCrLf & "
* * " & vbCrLf & " * * STEP: Step-1" & vbCrLf & " * * " & vbCrLf
& " * Step, name=Step-1, inc=10000" & vbCrLf & " * Heat Transfer,
end=PERIOD, deltmx=10. "

```

```

a = a & vbCrLf & Text5.Text & ", " & Text6.Text & ", " &
Text7.Text & ", " & Text8.Text & ", "

```

' 边界

```

a = a & vbCrLf & " * * " & vbCrLf & " * * BOUNDARY
CONDITIONS" & vbCrLf & " * * "

```

```

a = a & vbCrLf & " * * Name: Temp-BC-1" & " Type:
Temperature" & vbCrLf & _ " * Boundary, amplitude = AMP - N" &
vbCrLf & List3.List(1) & ", 11, 11, " & Text4.Text

```

```

a = a & vbCrLf & " * * Name: Temp-BC-2" & " Type:
Temperature" & vbCrLf & _ " * Boundary, amplitude = AMP - W" &
vbCrLf & List3.List(0) & ", 11, 11, " & Text10.Text

```

```

a = a & vbCrLf & " * * " & vbCrLf & " * * OUTPUT
REQUESTS" & vbCrLf & " * * " & vbCrLf & _ & " * Restart, write,
frequency=0" & vbCrLf & " * * " & vbCrLf & " * * FIELD OUTPUT:
F-Output-1" & vbCrLf & " * * " & vbCrLf & " * Output, field" &
vbCrLf & " * Element Output, directions = YES" & vbCrLf & " HFL,
TEMP, SDV"

```

```

a = a & vbCrLf & " * * " & vbCrLf & " * * FIELD OUTPUT:
F-Output-2" & vbCrLf & " * * " & vbCrLf & _ & " * Node Output" &

```





```
vbCrLf & "NT, RFL, COORD" & vbCrLf & " * NODE PRINT, NSET=  
ZJ" & _ vbCrLf & "NT" & vbCrLf & " * EL PRINT, ELSET=HH" &  
vbCrLf & "SDV1" & vbCrLf & " * * " _ & vbCrLf & " * * HISTORY  
OUTPUT; H-Output-1" & vbCrLf & " * * " & vbCrLf & " * Output,  
history" & vbCrLf & " * Radiation Output" & vbCrLf & "FTEMP, " &  
vbCrLf & " * End Step"
```

```
Print #1, a
```

```
Close #1
```

```
' 关闭一号工作区 Close #1
```

```
Else
```

```
a = MsgBox("请导入文件", 1, "提示")
```

```
err_1:
```

```
End Sub
```

```
' 提交计算
```

```
Private Sub Command13_Click()
```

```
On Error GoTo err_1
```

```
Dim inputfilename_bat As String
```

```
inputfilename_bat = inputfilename & Text9.Text & ".bat"
```

```
Open inputfilename_bat For Output As #1
```

```
If form1option1value = False Then
```

```
Print #1, "call abaqus job=" & Text9.Text & " int"
```

```
Else
```

```
Print #1, "call abaqus job=" & Text9.Text & " user=KR
```

```
int"
```

```
End If
```

```
Close #1
```

```
X = Shell(inputfilename_bat)
```

```
err_1:
```

```
End Sub
```



```
' 检索结果文件 DAT,提取温度值
Private Sub Command7_Click()
    Dim a() As String
    a = Split(Text1.Text, ",")
    For i = 0 To UBound(a)
        List4.AddItem a(i)
    Next
    Dim pos As Integer
    Dim target As String
    Dim temp As String
    outputfilename = inputfilename & Text9.Text & ".dat"
    For i = 1 To List4.ListCount
        Load Me.List6(i)
        List6(i).Top = List6(i - 1).Top + List6(0).Height + 5
        List6(i).Left = 13200
        List6(i).Visible = True
        Open outputfilename For Input As #1
        Do While Not EOF(1)
            Line Input #1, temp
            target = "NODE FOOT— NT11"
            pos = InStr(1, temp, target)
            If pos > 0 Then
                ' 找到了匹配字符串
                Line Input #1, temp
                Line Input #1, temp
                For j = 1 To i
                    Line Input #1, temp
                Next
                List6(i).AddItem Mid(temp, pos + 8)
```



```
List6(i).Visible = False
End If
Loop
Close #1
Next
End Sub
' 检索结果文件 DAT,提取硫化程度
Private Sub Command3_Click()
    Dim b() As String
    b = Split(Text11.Text, ",")
    For i = 0 To UBound(b)
        List5.AddItem b(i)
    Next
    Dim pos As Integer
    Dim target As String
    Dim temp As String
    outputfilename = inputfilename & Text9.Text & ".dat"
    For i = 1 To List5.ListCount
        Load Me.List7(i)
        List7(i).Top = List7(i - 1).Top + List7(0).Height + 5
        List7(i).Left = 13200
        List7(1).Visible = True
        Open outputfilename For Input As #1
        Do While Not EOF(1)
            Line Input #1, temp
            target = "ELEMENT PT FOOT—"
            pos = InStr(1, temp, target)
            If pos > 0 Then
                '找到了匹配字符串
```



```
Line Input #1, temp
Line Input #1, temp
Line Input #1, temp
For j = 1 To (i - 1) * Text8.Text + 1
    Line Input #1, temp
Next
List7(i).AddItem Mid(temp, pos + 12)
List7(i).Visible = False
End If
Loop
Close #1
Next
End Sub
' 创建 excel
```

```
Private Sub Command8_Click()
    Dim xlApp As excel.Application 'Excel 对象
    Dim xlBook As excel.Workbook '工作簿
    Dim xlsheet As excel.Worksheet '工作表
    ' 识别时间
    Dim pos As Integer
    Dim target As String
    Dim temp As String
    outfilename = inputfilename & Text9.Text & ".dat"
    Open outfilename For Input As #1
    Do While Not EOF(1)
        Line Input #1, temp
        target = "TOTAL TIME COMPLETED"
        pos = InStr(1, temp, target)
        If pos > 0 Then
```



```
        ' 找到了匹配字符串
        List8.AddItem Mid(temp, pos + 28)

    End If

Loop

Close #1

Set xlApp = CreateObject("Excel.Application") ' 创建 EXCEL 对象
Set xlBook = xlApp.Workbooks.Add ' 新建 EXCEL 工作簿文件
xlApp.Visible = False ' 设置 EXCEL 对象不可见
Set xlsheet = xlBook.Worksheets(1) ' 设置活动工作表''

Dim t As Integer
For n = 1 To List8.ListCount
    If n = 1 Then
        xlsheet.Cells(1, 1) = "时间"
    Else
        xlsheet.Cells(n, 1) = List8.List(n - 1) ' 当前工作簿第一
        页的第 I 行第 J 列
    End If
Next n

For i = 2 To List4.ListCount + 1
    t = List6(i - 1).ListCount
    For n = 1 To t
        If n = 1 Then
            xlsheet.Cells(1, i) = "节点" & List4.List(i - 2)
        Else
            xlsheet.Cells(n, i) = List6(i - 1).List(n - 1) ' 当前工作
            簿第一页的第 I 行第 J 列
        End If
    Next n
Next
```



' 生成 List 控件数组

For i = List4.ListCount + 3 To List4.ListCount + List4.ListCount + 2

For n = 1 To List8.ListCount

If n = 1 Then

xlsheet.Cells(1, i) = "时间"

Else

xlsheet.Cells(n, i) = List8.List(n - 1) ' 当前工作簿第一

页的第 I 行第 J 列

End If

Next n

Next

' 取温度点

For j = 1 To List5.ListCount

For n = 1 To List7(j).ListCount

If n = 1 Then

xlsheet.Cells(1, List4.ListCount + 3 + j) = "单元" &

List5.List(j - 1)

Else

xlsheet.Cells(n, List4.ListCount + 3 + j) = List7(j).

List(n - 1)

End If

Next n

Next j

xlsfilename = inputfilename & Text9.Text & ".xls"

xlsheet.SaveAs xlsfilename

xlApp.Quit

Set xlApp = Nothing ' 释放 xlApp 对象

If List5.ListCount > 0 Then

Set xlApp = Nothing



```
Set xlBook = Nothing
Set xlsheet = Nothing
Call TB_Click
Set xlApp = Nothing
Set xlBook = Nothing
Set xlsheet = Nothing
End If

End Sub

' 驱动 EXCEL 画散点图
Private Sub TB_Click()
    Dim i As Integer
    Dim k As Integer
    On Error GoTo err_1
    Set xlApp = CreateObject("Excel. Application")
    Set xlBook = xlApp. Workbooks. Open(inputfilename & Text9. Text &
". xls")
    Set xlsheet = xlBook. Worksheets(1)
    If List4. ListCount <> 0 Then
        Set charttest = xlApp. Worksheets(1). ChartObjects. Add(25,
110, 400, 300)
        charttest. Chart. ChartType = xlXYScatterSmoothNoMarkers
        i = List4. ListCount + 1
        charttest. Chart. SetSourceData Source:=Sheets("Sheet1"). Range
("A1:" & Chr(64 + i) & List6(1). ListCount), PlotBy:=xlColumns
        charttest. Chart. Location Where:=xlLocationAsObject, Name:
="Sheet1"
        With charttest. Chart
            . HasTitle = True
            . ChartTitle. Characters. Text = "时间—温度关系图"
```



```

        .Axes(xlCategory, xlPrimary).HasTitle = True
        .Axes(xlCategory, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text
= "时间/s"
        .Axes(xlValue, xlPrimary).HasTitle = True
        .Axes(xlValue, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text =
"温度/c"
    End With
    charttest.Chart.ChartArea.Copy ' 将分析所得的图表拷贝到剪
贴板
    Picture2.Picture = Clipboard.GetData() ' 再将剪贴板上的图表
赋给 PictureBox
    SavePicture Picture2.Image, inputfilename & ".Text9.Text & ".1"
& ".bmp" ' 保存图表
End If
If List5.ListCount <> 0 Then
    Set charttest = xlApp.Worksheets(1).ChartObjects.Add(25,
110, 400, 300)
    charttest.Chart.ChartType = xlXYScatterSmoothNoMarkers
    i = List4.ListCount + 3 + List5.ListCount
    Dim ff As String
    ff = Chr(67 + List4.ListCount) & 1 & ":" & "D1:"
    charttest.Chart.SetSourceData Source:=Sheets("Sheet1").Range(ff
& Chr(64 + i) & _List7(1).ListCount), PlotBy:=xlColumns
    charttest.Chart.Location Where:=xlLocationAsObject, Name:=
"Sheet1"
    With charttest.Chart
        .HasTitle = True
        .ChartTitle.Characters.Text = "时间—硫化程度关系图"
        .Axes(xlCategory, xlPrimary).HasTitle = True
    End With
End If

```





```
. Axes(xlCategory, xlPrimary). AxisTitle. Characters. Text =  
"时间/s"  
. Axes(xlValue, xlPrimary). HasTitle = True  
. Axes(xlValue, xlPrimary). AxisTitle. Characters. Text =  
"硫化程度/100%"  
End With  
ActiveChart.ChartArea.Select  
ActiveSheet.Shapes("图表 2").IncrementLeft 500  
ActiveSheet.Shapes("图表 2").IncrementTop 0  
ActiveSheet.Shapes("图表 2").IncrementTop 0  
charttest.Chart.ChartArea.Copy ' 将分析所得的图表拷贝到  
剪贴板上  
Picture1.Picture = Clipboard.GetData() ' 再将剪贴板上的图  
表赋给 PictureBox  
SavePicture Picture1.Image, inputfilename & Text9.Text & "  
2" & ". bmp" ' 保存图表  
End If  
xlBook.Save  
xlBook.Close  
xlApp.Quit  
xlApp.Quit  
Set xlApp = Nothing  
Set xlApp = Nothing  
Set xlBook = Nothing  
Set xlsheet = Nothing  
err_1:  
End Sub  
' 打开结果文件 EXCEL  
Private Sub Command1_Click()
```



```
Dim xlBook As excel. Workbook
Dim xlApp As excel. Application
On Error GoTo err_1
Dim xlsfilename As String
xlsfilename = inputfilename & ".xls"
Set xlApp = CreateObject("Excel.Application")
Set xlBook = xlApp.Workbooks.Open(xlsfilename)
xlApp.Visible = True
```

```
err_1:
```

```
End Sub
```

```
' 查看 ODB 结果文件
```

```
Private Sub Command15_Click()
```

```
    On Error GoTo err_1
```

```
    Dim odbfilename As String
```

```
    odbfilename = inputfilename & ".odb"
```

```
    Shell "cmd /k " & Chr(34) & odbfilename
```

```
err_1:
```

```
End Sub
```

#### 4) 界面四

```
' 浏览材料库文件
```

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
    CommonDialog1.ShowOpen
```

```
    Text1.Text = CommonDialog1.filename
```

```
End Sub
```

```
' 添加材料库
```

```
Private Sub Command2_Click()
```

```
    Dim CLName As String
```

```
    CLName = Mid$(Text1.Text, InStrRev(Text1.Text, "\") + 1)
```

```
    If Dir(App.Path & "\材料库\" & CLName) <> "" Then
```



```
MsgBox "文件 " & CLName & " 已存在!"
Else
    FileCopy Text1.Text, App.Path & "\材料库\" & CLName
    Open App.Path & "\材料库\材料库文件名称.txt" For
Append As #1
    Print #1, vbCrLf & CLName
    Close #1
    MsgBox "材料库添加成功!"
    Form2.Combo3.Clear
    Open App.Path & "\材料库\材料库文件名称.txt" For Input
As #2
    Dim temp As String
    Dim CL As Integer
    CL = 0
    Form2.Combo3.AddItem "材料库"
    Do While Not EOF(2)
        Line Input #2, temp
        If temp <> "" Then
            Form2.Combo3.AddItem temp
        End If
        CL = CL + 1
    Loop
    Close #2
    Form2.Combo3.Text = "材料库"
    Unload Me
End If
End Sub
```





## 参考文献

- [1] RAFEI M, GHOREISHY M H R, NADERI G. Development of an advanced computer simulation technique for the modeling of rubber curing process [J]. Computational Materials Science, 2009, 47(2): 539 - 547.
- [2] GHORREISHY M H R, NADERI G. Three-dimensional finite element modeling of rubber curing process [J]. Journal of Elastomers and Plastics, 2005, 1(37): 37 - 53
- [3] GHOREISHY M H R. Numerical simulation of the curing process of rubber articles [J]. Computational Materials, 2009: 445 - 478.
- [4] ABHILASH P M, KANNAN K, VARKEY B. Simulation of curing of a slab of rubber [J]. Materials Science and Engineering: B, 2010, 168(1): 237 - 241.
- [5] NOZU S, TSUJI H, ITADANI M, et al. Study of cure process of thick solid rubber [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201(1):
- [6] WANG P Y, QINN H L, YU H P. Kinetics of natural rubber vulcanization in the end stage of curing period [J]. Journal of applied polymer science, 2006, 101(1): 580 - 583.
- [7] ARRILLAGA A, ZALDUA A M, ATXURRA R M, et al. Techniques used for determining cure kinetics of rubber compounds [J]. European Polymer Journal, 2007, 43(11): 4783 - 4799.
- [8] ROSCA I D, Vergnaud J M. Rheometers in scanning mode by changing the rates of linear temperature programming for the cure of rubbers [J]. Polymer testing, 2004, 23(1): 59 - 67.
- [9] 王贵一. 可提高效率和降低成本的十种测试方法[J]. 世界橡胶工业, 2007, 34(4): 26 - 31.
- [10] NAZOCKDAST H, GOHARPEY F, DABHIR B. Mathematical modeling and experimental study of conveyor belt continuous curing process [J]. Journal of applied polymer science, 2000, 77(11): 2448 - 2454.
- [11] 5 闫相桥, 童剑. 轮胎硫化过程的数值模拟技术[J]. 复合材料学报, 2003, 20(1):



- 67-73.
- [12] 曾钊,江楠,邹少异等. 轮胎硫化过程的有限元仿真[J]. 橡胶工业,2004,51(11): 682-684.
- [13] 施斌,王国林,张建等. 子午线轮胎硫化过程仿真[J]. 汽车技术,2008,(10):56-59.
- [14] 邹少异,江楠,王延项. 不同变温硫化工艺下轮胎硫化效果分析[J]. 弹性体,2008,18(6):19-22.
- [15] 卢慧娟,陈廷,王友善等. 子午线轮胎硫化过程有限元分析[J]. 轮胎工业,2009,29(3):172-175.
- [16] 郑月军. 橡胶轮胎定型硫化前微波预热的技术与装备的研究[D]. 广州:华南理工大学,2005.
- [17] 唐伟强,郑月军,张海等. 橡胶轮胎胎坯硫化前微波预热的研究[J]. 特种橡胶制品,2005,26(4):56-58.
- [18] 曾钊,江楠,李伟军等. 预热温度对轮胎硫化温度场及程度场的影响[J]. 橡胶工业,2005,52(1):44-47.
- [19] 朱永康. 日本神户制钢在印度合资橡胶机械[J]. 现代橡胶技术,2011,2:003.
- [20] KLEINER B T, JESKE W, LORETH W. New crosslinking agent increases stability [J]. Rubber & plastics news, 2002,32(5):29-36.
- [21] RU F, ZHANG Y, LI F, et al. Effect of High-temperature Curing on the Crosslink Structures and Dynamic Mechanical Properties of Gum and N330-filled Natural Rubber Vulcanizates [J]. Polymer Testing March, 2001,20(8):925-936.
- [22] SZELUGA U, MORYC P. Curing of dicyanate ester/epoxy copolymers modified with polysiloxane and butadiene-acrylonitrile rubbers [J]. Journal of thermal analysis and calorimetry, 2012,109(1):73-80.
- [23] RIYAJAN S A, CHAIPONBAN S, CHUSRI S, et al. Mechanical properties and cure test of a natural rubber/poly(vinyl alcohol) blend [J]. Rubber Chemistry and Technology, 2012,85(1):147-156.
- [24] 杨世铭. 传热学基础[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
- [25] 尹清珍,崔海波,陈海英. 全钢子午线轮胎活络模的初步研究[J]. 特种橡胶制品,2006,27(3):45-47.
- [26] 陈晓峰,余文松. 轮胎定型硫化机加热板的改进[J]. 广东化工,2007,34(4): 112-113.
- [27] 张忠明. 轮胎定型硫化机蒸锅式硫化改造为热板式硫化[J]. 橡塑技术与装备,2007,33(3):44-46.
- [28] 华松,刘沛,田忠安. 全钢载重子午线轮胎硫化机蒸锅式改热板式硫化工艺的改进[J]. 轮胎工业,2012,32(5):293-295.
- [29] 董国林. 轮胎硫化机热力除氧器的应力腐蚀裂纹及预防[J]. 轮胎工业,2000,20(4): 236-237.
- [30] 王存鑫. 轮胎氮气硫化 PSA 供氮机理及实验研究[D]. 山东:青岛科技大学,2007.